

饱和原状黄土液化基本特征的振动台试验研究^①

王兰民^{1,2}, 刘 琨^{1,2,3}, 孙军杰^{1,2}, 田文通², 柴少峰^{1,2}, 徐舜华^{1,2}

(1.中国地震局黄土地震工程重点实验室,甘肃 兰州 730000;

2.中国地震局兰州地震研究所,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:天然黄土因其较强的结构性,制备大尺寸原状试体非常困难,国内外尚无针对饱和原状黄土实施振动台模拟试验的数据与资料。通过解决大尺寸原状黄土试体现场取备难题,利用振动台模拟试验研究饱和原状黄土液化现象及其基本特征。试验结果表明:饱和原状黄土的液化现象,在超孔隙水压力增长、持续与消散的趋势性上与饱和砂土具有可比性,二者的最大差别在于细节特征方面的不同;饱和度是决定地震作用下天然黄土液化特性的首要条件;试体饱和度约为 90.3% 的条件下,加载后的最大孔压比约为 0.93;饱和度 85%、75% 和 65% 可能是天然黄土能否发生液化现象、似液化现象(循环失效)和不考虑循环失效现象的临界值。试验获得的资料与分析结果,对深入理解饱和土体液化物理过程与力学机制意义重大。

关键词:原状黄土; 振动台; 地震动; 液化特征; 孔隙水压力

中图分类号: TU44

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2015)04-1023-006

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2015.04.1023

Shaking-table Tests on Liquefaction Characteristics of Saturated Undisturbed Loess

WANG Lan-min^{1,2}, LIU Kun^{1,2,3}, SUN Jun-jie^{1,2}, TIAN Wen-tong²,
CHAI Shao-feng^{1,2}, XU Shun-hua^{1,2}

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

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

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

Abstract: Acquiring large-scale undisturbed samples of natural loess is very difficult due to its special original structure. Therefore, no data or documents are available of shaking-table testing on saturated samples of undisturbed loess soil around the world. In the present study, we address the problems of preparing large-scale undisturbed loess samples in the field and conducting research on the liquefaction features of saturated natural loess by means of shaking-table testing. Previous testing results have shown that the development process of excess void water pressure during loess liquefaction, such as accumulation, continuance, and dissipation, is the same as that with saturated sand; the essential differences between the cases of loess and sand focus only on detailed characteristics. The degree of saturation is the most important factor in controlling the liquefaction behavior of natural loess under seismic loading. For this case of the shaking-table test, the void water pressure ratio of undisturbed loess samples can reach 0.93 at saturation conditions of 90.3%. Moreover, the degree of saturation at 85%, 75%, and 65% may be critical values associated

① 收稿日期: 2014-08-20

基金项目:国家自然科学基金项目(50978239, 51209186); 中国地震局地震预测研究所基本科研业务费项目(2013IESLZ01)

作者简介:王兰民(1960—), 男, 陕西蒲城人, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事土动力学与岩土地震工程方面的研究工作。

E-mail: wanglm@gssb.gov.cn.

with liquefaction phenoment, similar liquefaction phenomena (cyclic failure), and that without consideration of cyclic failure, respectively. In short, first-hand data of liquefaction features of natural loess acquired by the shaking-table test and corresponding analysis results based on that data could advance the present understanding of the physical process and mechanism of saturated soil under seismic loading.

Key words: undisturbed loess; shaking table; ground motion; liquefaction characteristics; pore water pressure

0 引言

天然黄土在工程地质与力学性质方面表现出的独特性^[1],与土体具有的多孔隙、弱胶结的结构特征密切相关^[2-3]。地震作用下的饱和黄土液化现象的基本特征,也必然受土体具有的上述结构特性的控制。天然黄土因地区、埋深不同存在明显的差异性,饱和黄土液化过程及其所表现出的直观现象较之饱和砂土更为复杂,这一点也充分体现在针对饱和黄土液化的已有研究认知的不断变化当中。

饱和黄土液化研究自 20 世纪 80 年代后在国内外逐步受到重视。与地震作用有关的黄土液化实例,较为典型的有 1920 年我国海原地震引起的宁夏固原附近的石碑塬液化,发生于清水河二、三级阶地上的 Q_3 黄土层中^[4]; 1811 年和 1812 年美国新马德里 3 次 8 级地震引发的 Reelfoot 湖地区液化,发生于密西西比河二级阶地上的 Q_3 黄土层中^[5-6]; 1989 年前苏联塔吉克斯坦 5.5 级地震引起的吉萨尔液化,发生于缓斜坡丘陵地带近乎平坦的黄土场地上^[7]。

饱和黄土液化的研究方法基本由砂土液化承袭而来。因为黄土在物理力学性质方面的复杂性和多变性,在研究初期,国外学者曾认为黄土的液化现象属于循环失效,应当称之为似液化现象,与砂土的液化现象必须给予明确区分^[8]。进入 21 世纪后,我国在黄土液化研究上更加深入^[9-10];反压饱和法的应用,证实了过去室内饱和黄土液化试验借自砂土的饱水方法的不足,由于黄土相对砂土更低的渗透性,试体能够达到的饱和度仅约 80%,这可能是黄土液化过程中孔隙水压力达不到围压的主因^[11]。

天然黄土具有的初始结构性,使得制备大尺寸试体的工作变得十分困难。因此,国内外在饱和黄土液化的振动台试验方面,此前未有相关研究工作。这一点,也是导致黄土液化研究深入程度相比砂土薄弱很多的重要原因。虽然目前室内动三轴试验揭示了饱和黄土液化的孔隙水压力能够增长到围压,但动三轴试验的边界效应的影响过大,更大尺寸的

饱和黄土试体是否也如此,其表现是否与砂土液化的已有研究结果具有可比性,尤其是孔隙水压力增长、持续和消散的细节过程,这些问题都需要真正意义上的振动台试验来检验。鉴于此,本文在解决大尺寸原状黄土试体现场取备难题的基础上,依托南京工业大学建筑结构与材料实验室的振动台,试验研究了饱和原状黄土液化现象及其基本特征。研究获得的第一手试验资料及其分析结果,对深入理解饱和土体液化物理过程与力学机制意义重大。

1 振动台试验方案

1.1 原状黄土试体取备

大尺寸原状黄土试体的现场取备,最大的难点是如何保留天然黄土的初始结构性,需要在取土埋深和模型箱等两方面做出取舍。本次振动台试验所用的大尺寸原状黄土试体,取自典型黄土场地的浅部。首先,挖去其上 0.2 cm 左右的浮土,依照模型箱尺寸现场塑形;其次,套装模型箱,完成吊装。由于取土需要,模型箱被设计为内衬有机玻璃板的角钢框架样式,未采用剪切箱体。模型箱内衬的有机玻璃板能够产生足够的柔性变形,可在一定程度上降低箱体边界效应的影响。此外需要说明的一点是,因为取样所限以及防渗水处理的需求,土样在试验时实际上是上下颠倒的。考虑现场取备的试体的埋深及实际尺寸等问题,这一情况对饱和黄土液化现象及其关键特征应当不致产生影响。

图 1 为原状黄土试体的现场取备情况。表 1 为制备的 6 个试体的尺寸数据。试体装车时,在卡车底部铺设 10 cm 厚度的塑料泡沫板和 1 层棉被,同时运送过程中卡车选择走高速公路,以降低车辆颠簸对试体的可能影响。

1.2 传感器埋设

表 1 给出了 6 个原状黄土试体的试验内容,虽然各有针对性,但每个试体都对天然黄土的液化特性进行了监测。鉴于振动台试验过程中的实际效果(试体 1 和试体 6 的箱体漏水,饱和度较低而未达到

液化,但在饱和度影响液化的定量分析上有重要作用)及篇幅限制,此处仅以试体 4 作为论文分析的主要对象,传感器埋设情况也以该试体为例给出。



图 1 模型试体现场取备

Fig.1 In-situ preparation of undisturbed loess samples for shaking table test

表 1 原状黄土试体净尺寸

Table 1 Net size of undisturbed loess samples

模型编号	测试内容	尺寸/mm			备注
		长	宽	高	
1	液化基本特性	580	560	500	-
2		580	560	500	-
3	桩基负摩阻力	880	860	500	-
4		580	560	500	-
5	桩基水平推力	580	560	500	底部坡比 1:2
6		580	560	500	底部坡比 1:4

图 2 为试体 4 的微型传感器布设方案。传感器布设时,使用旋转式洛阳铲钻孔,孔径 4.8cm。成孔后,自下而上依照图 2 放置相应微型传感器后回填。加速度计对地震动的响应,与所在位置的土体密度直接关联。试验中选用的是微型加速度计(三向电容式加速度传感器,型号 DH301,江苏东华测试技术股份有限公司生产),埋置时将取出的黄土全部回填,以保证孔内黄土扰动前后的密度基本相当。

考虑成孔回填时孔径范围内的黄土已被扰动,对于孔隙水压力计(型号 CYY2,西安德威科仪表公司生产,精度 0.1 kPa),在其上下 2~3 cm 范围内填充粗砂(土质均匀,粒径接近 2 mm,不进行特别压密),以构建水压传递的流畅通道(余下的孔洞空间以黄土回填,局部压密以降低其渗透性)。基于这样的埋设方式,微型孔压计测得的数据,可被认定为粗砂周围水平向上的饱和原状黄土在地震动加载下的超孔隙水压力(经过具有良好渗透性的砂层传递而来)。

1.3 试体饱水

传感器埋设完毕后对试体进行饱水处理。考虑

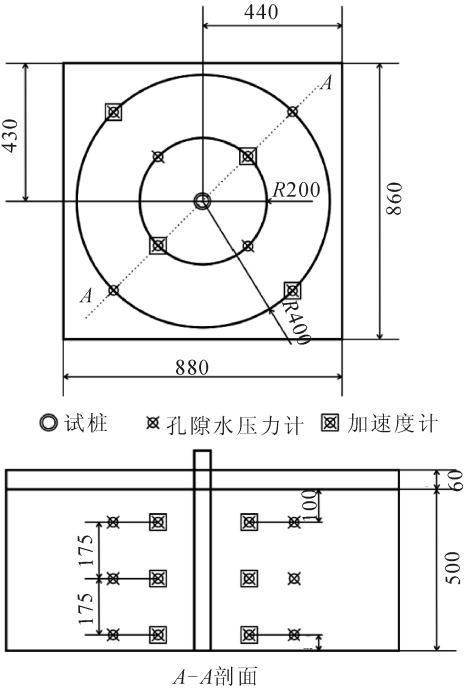


图 2 模型试体 4 的传感器布设示意(单位:mm)

Fig.2 Arrangement sketch of micro sensors within the No. 4 sample(Unit:mm)

天然黄土具有良好的垂向渗水性,饱水处理采用上部加水浸泡方式(加水过程持续了 1.5 天)。为保护模型试体表面的黄土在饱水时不被冲击破坏,土体表面疏松铺设约 3.0~4.0 cm 厚的角砾石(粒径 0.5~1.0 cm)。表 2 汇总了各模型箱加水情况(模型 1、6 在加水时局部侧漏,具体漏水量由模型箱外部铺设的干水泥的吸水质量估计,准确度可能会受一定影响;1、3 和 6 号试体在第 3 工况前额外加水)。

1.4 加载地震动

为保证不同试体受载的同步性与一致性,尽量降低可能存在的系统误差及环境因素等对试验结果的影响,按振动台的实际尺寸,将 6 个模型试体均布于台面之上,同时加载修正给定的地震动时程(压缩波形以提高主频,使缩尺模型获得更好的激振)。试验过程中,5 种工况在两相间隔 10~15 分钟之后接续加载,以研究饱和和天然黄土液化后再次液化的可能性。

图 3 为加载的地震动时程示例,表 3 为由示例时程修正给定的 5 个工况的加载地震动的特征参量。

2 饱和和原状黄土液化基本特征

第 1 工况加载的后半阶段,试体 2、3、4、5 明显表现出强度丧失的特征,从垂直加载方向的角度来

看,模型箱内的土体表面左右对称起伏,具有显著的类似水体的直观现象(试体 4、5 较之试体 2、3 更为明显)。图 4 给出了试验加载前后饱和原状黄土液化现象的对比照片(以试体 4 为例)。

表 2 模型试体基本物性参数及加水情况

试体编号	密度/(g·cm ⁻³)			含水率/%	孔隙比	饱水量/kg			饱和度	
	天然	干	饱水			自含	振动	后加	前	后
1	1.54	1.41	2.331	9.35	0.921	21.8	35.3	5.4	64.1	70.1
2	1.47	1.38	2.340	6.50	0.960	14.9	67.6	0.0	87.6	87.6
3	1.42	1.37	2.352	4.03	0.982	21.3	122.0	12.9	76.2	83.1
4	1.48	1.39	2.336	6.48	0.946	14.9	69.5	0.0	90.3	90.3
5	1.49	1.42	2.332	5.30	0.912	12.5	65.3	0.0	84.5	84.5
6	1.49	1.42	2.332	5.30	0.912	12.5	26.0	4.8	48.7	54.8

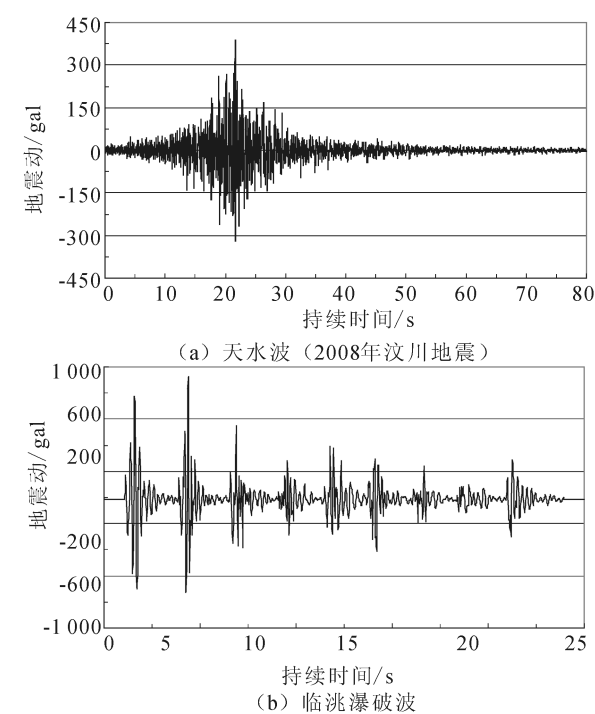


图 3 加载地震动

Fig.3 Time histories of seismic loadings

表 3 加载工况及地震动特征参量
Table 3 Loading conditions and characteristic parameters of ground motion for the shaking table test

工况	地震动	PGA/(m·s ⁻²)	持续时 间/s	步长/s	卓越频 率/Hz
1	天水波	3.80	80	0.005	5
2		2.60	50	0.050	5
3		3.60	50	0.005	5
4	临兆爆	6.50	25	0.020	17
5	破波	9.30	25	0.020	17

图 4(a)显示,加载前试体顶部角砾层表面无明显水体(实际上,角砾石仅能看到有些湿润,所加水体全部浸入其下的原状黄土之中)。由图 4(b)可见,饱和原状黄土在经过工况 1 加载后即出现了明

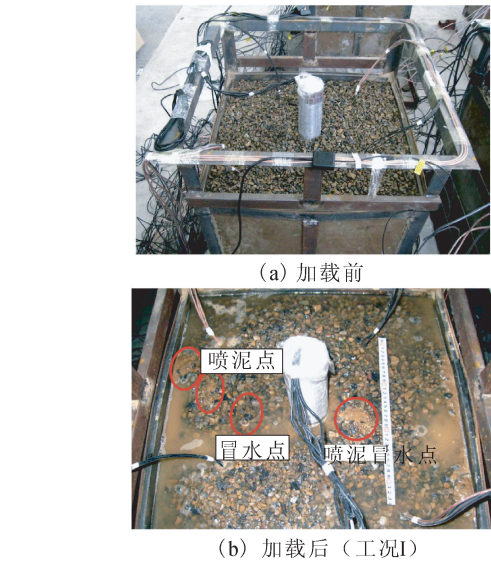


图 4 饱和黄土液化宏观现象照片

Fig.4 Liquefaction pictures of saturated undisturbed loess

显的液化现象,宏观上,起先赋存于黄土内部的水体涌出并漫过上覆的角砾层;在局部,可看到极为清晰的喷砂(泥)冒水迹象。天然黄土试体表层覆盖的角砾层,有利于其下覆土体内部孔隙水压力的快速消散,因此喷泥冒水现象并不如以往顶部覆盖相对近乎隔水的黏土层的饱和砂土振动台试验当中的那样显著。但是直观迹象已经能够说明饱和天然黄土实际上发生了与饱和砂土相一致的液化现象。这一点足够证明饱和状态下的天然黄土在液化时,其孔隙水压力能够接近围压并达到突破上覆土层压力的程度。

图 5 为试体内部孔隙水压力的记录数据,该孔压计埋深 13 cm(含表层铺设的砾石层厚度),上覆压力约为 1.83 kPa。在经过地震动加载之后,超孔隙水压力的平台均值约为 1.7 kPa,对应的孔压比约为 0.93;孔隙水压力保持 162 s 后开始下降,对应的自然消散速率明显低于孔压增长阶段(188 s 时降至

0.8 kPa,接近后者的五分之一)。

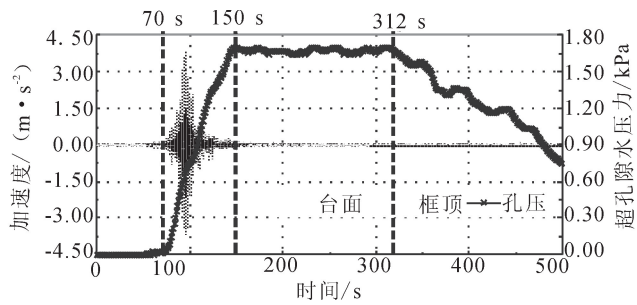


图 5 试体 4 内部孔隙水压力变化曲线
Fig.5 Variation curve of void water pressure in the No.4 sample

由图 5 同时能够看出,模型箱顶部的加速度响应量值明显低于台面上的记录数据,前者约为后者的二分之一。假若将地震动加速度之间的差异理解为能量损失,那么这部分损失应当是导致土体产生塑性变形及其内部孔隙水压力增长的能量来源。这一试验数据反映的现象,可为孔隙水压力在后续阶段(加载停止后)的消散,提供较为合理的解释,即再未有能量使其保持在原有量值水准之上。

表 4 给出了对应的天然黄土试体内部响应地震动加载的加速度实测数据。对比分析能够发现,模型试体内部的加速度在整体上明显小于台面的记录(与图 5 显示的结果具有一致性),并且具有随上覆压力降低而增高的趋势。不过,在箱框顶部的加速度并未超过最浅埋深位置的量值,而是与土体中部的记录接近。该现象可能与角钢框架的加载响应与其内部试体,尤其是浅部土体的不甚同步有关(造成了能量的损失),这一反常表明本次振动台试验中采用的模型箱体在一定程度上实现了加载由底部向上逐渐传递的过程,实际上是对箱体边界效应的一种削弱。此外,饱和天然黄土液化后,土体对地震动加载的响应明显变弱,这是液化土体的减震效应的一个例证。

3 饱和度对黄土液化的定量控制

地震动、孔隙比和饱和度是影响饱和土体液化的关键性因素,其中饱和度更是决定土体是否能够发生液化的首要条件。有关饱和天然黄土液化的研究,在过去之所以会有必须与砂土液化严格区分的结论,和试验时的土体饱和度不无关联。因此,此处对控制饱和黄土液化的关键性因素,以分析饱和度的影响为主要对象。为得出与之相关的定量化的参考标准,笔者对加载完毕后的 6 个模型试体的液化情况进行了细致的区分与对比(见表 5)。

表 4 模型试体 4 内部地震动响应统计结果(每层 4 个加速度计记录数据求均值)

Table 4 Statistical results of seismic loading response within the No. 4 sample (for each buried depth, averaging the data recorded by 4 accelerometers)

工况	埋深/cm	PGA/(m·s ⁻²)				台面/框顶
		正峰	负峰	均值	积分值	
1	10	2.34	2.22	2.28	12.36	3.80/1.90
	27.5	1.79	2.13	1.97	7.15	
	45	1.58	2.12	1.85	5.98	
2	10	1.12	1.64	1.38	3.44	2.60/1.17
	27.5	0.95	1.35	1.15	3.09	
	45	0.89	1.39	1.15	3.09	
3	10	1.49	1.73	1.61	6.91	3.60/1.45
	27.5	1.21	1.60	1.40	4.31	
	45	1.10	1.66	1.38	3.88	
4	10	1.77	2.38	2.07	2.48	6.50/1.87
	27.5	1.81	2.67	2.25	2.33	
	45	1.60	2.23	1.92	2.27	
5	10	2.52	3.15	2.83	3.01	9.30/2.42
	27.5	2.25	3.35	2.80	3.39	
	45	2.01	2.57	2.29	3.02	

结合图 4、5 中的结果,由表 5 能够看出,天然黄土饱和度 75%可能是发生似液化(循环失效)现象的临界值,85%可能是发生与砂土液化具有可比性的液化现象的临界值,65%以下基本可以不必考虑循环失效的可能性。

土体饱和度与其渗水性密切相关,渗水性与其包含的土颗粒的主体粒径直接相关。考虑天然黄土以粉粒(0.05~0.005 mm)为主,与具有液化性的典型砂土(细砂、粉砂:0.25~0.10 mm、0.10~0.05 mm)存在显著差异,因此在饱和度方面具有更细颗粒分区的黄土相较砂土不易达到更高的量值。不过,值得注意的是,细砂、粉砂的孔隙比一般分别在 0.7、0.8 以下^[12],典型天然黄土(Q₃)的孔隙比通常在 0.9 左右^[10],这就意味着在饱和度相同的条件下,黄土内的水体含量要高于砂土。倘若考虑天然黄土内粒径过细部分可能引起的饱和度在分布上的不均匀性以及此类土颗粒对液化的较弱贡献(应力传递过程中的较低参与性),由孔隙比差异(按上文数据,黄土取 0.9、砂土取 0.8 及 0.75)大致能够估算得出,天然黄土饱和度相较饱和砂土低于 15%(孔隙比差异的实际计算值为 12.5~20%)以内的情况下,二者应会具有可进行类比的液化现象。这一数据,是对前述将饱和度 85%作为天然黄土液化现象临界值的另一佐证,虽然 15%仅是基于土体物性的均值性参量初步估测得来(精确度仍待完善)。

表 5 模型试体加载完后土体性状分析
Table 5 Analysis of soil behaviors within natural loess samples after all five seismic loadings

试体编号	饱和度/%	相对特性(程度)		液化情况	备注
		插入	搅动/拔出	综合判定	
2	87.6	极易	无阻滞感/带出物如水状	似液化(循环失效)	试体强度相对最高 饱和度后加至 83.1
3	76.2		(滑落后表面略有土粒残留)		
4	90.3	极易	无阻滞感/带出物如水状	液化(与砂土	喷泥冒水
5	84.5		(滑落后表面无土粒残留)	液化具可比性)	
1	64.1	较易	土体具有类似淤泥的蠕动现象(随次数增加愈加明显且范围不断扩大)/粘连稀泥	循环失效不完全	饱和度后加至 70.1
6	48.7	困难	无法搅动	未产生循环失效	饱和度后加至 54.8

4 结论

(1) 作为大尺寸饱和原状黄土液化振动台试验的首次尝试,本次研究揭示天然黄土液化的基本特性,尤其是超孔隙水压力增长、持续、消散的细节过程,同时也包括饱和度对地震作用下天然黄土液化特性的控制性作用及其定量参考标准。

(2) 饱和天然黄土液化现象与饱和砂土不存在实质性差异,二者之间的最大区别在于超孔隙水压力增长形态、平台孔隙水压力持续时间以及消散过程等方面的细节特征的不同。

(3) 饱和黄土受载时,地震动能量表现出显著的损失特征,这部分能量损失与土体塑性变形以及超孔隙水压力增长相关联,该现象可为解释地震动加载过程中孔隙水压力增长及其在后续阶段的消散提供动因方面的证据。

(4) 饱和度是天然黄土能否液化的首要决定性条件,饱和度 85%、75%和 65%可能是影响地震作用下饱和黄土液化特性的 3 个关键的参考量值,分别对应天然黄土的可类比为饱和砂土的液化现象、似液化现象(循环失效)和可不考虑循环失效的临界点。

参考文献(References)

[1] 王永焱,滕志宏.中国黄土的显微结构及其在时代上和区域上的变化[J].科学通报,1982,27(2):102-105.
WANG Yong-yan,TENG Zhi-hong.Microstructure Characteristics and Variation With Ages and Regions of Loess in China[J].Chinese Science Bulletin,1982,27(2):102-105.(in Chinese)

[2] 雷祥义.中国黄土的孔隙类型与湿陷性[J].中国科学:B 辑,1987,17(12):1309-1316.
LEI Xiang-yi.Pore Type and Collapsibility of Loess in China[J].Science in China:Series B,1987,17(12):1309-1316.(in Chinese)

[3] 高国瑞.黄土显微结构分类与湿陷性[J].中国科学:A 辑,1980,23(12):1203-1208.
GAO Guo-rui.Microstructure of Loss in China[J].Science in China:Series A,1980,23(12):1203-1208.(in Chinese)

[4] 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(6):1-5.
BAI Ming-xue,ZHANG Su-min.Landslide Induced by Liquefaction of Loessial Soil during Earthquake of High Intensity[J].Geotechnical Investigation and Surveying,1990(6):1-5.(in Chinese)

[5] Tuttle M,Lafferty R,Guccione M,et al.Use of Archaeology to Date Liquefaction Features and Seismic Events in the New Madrid Seismic Zone,Central United States[J].Geoarchaeology:An International Journal,1996,11(6):451-480.

[6] Tuttle M,Schweig E.Recognizing and Dating Prehistoric Liquefaction Features:Lessons Learned in the New Madrid Seismic Zone,Central United States[J].Journal of Geophysical Research,1996(B3):6171-6178.

[7] Ishihara K,Okusa S,OYAGI N,et al.Liquefaction-induced Flow Slide in the Collapsible Loess Deposit in Soviet Tajik[J].Soils and Foundations,1990,30(4):73-89.

[8] Boulanger R W,Meyers M W,Mejia L H,et al.Behavior of a Fine-grained Soil During Loma Prieta Earthquake[J].Canadian Geotechnical Journal,1998,35(1):146-158.

[9] 王兰民,刘红玫,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 Lan-min,LIU Hong-mei,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.(in Chinese)

[10] 王兰民,石玉成,刘旭,等.黄土动力学[M].北京:地震出版社,2003:91-141.
WANG Lan-min,SHI Yu-cheng,LIU Xu,et al.Loess Dynamics[M].Beijing:Earthquake Press,2003:91-141.(in Chinese)

[11] 孙海妹,王兰民,王平,等.饱和兰州黄土液化过程中孔压和应变发展的试验研究[J].岩土力学,2010,31(11):3464-3468.
SUN Hai-mei,WANG Lan-min,WANG Ping,et al.Experimental Study of Development of Strain and Pore Water Pressure During Liquefaction of Saturated Lanzhou Loess[J].Rock and Soil Mechanics,2010,31(11):3464-3468.(in Chinese)

[12] 《工程地质手册》编写委员会.工程地质手册(第三版)[M].北京:中国建筑工业出版社,2004,39:194-195.
Editorial Committee of Engineering Geology.Handbook of Engineering Geology(3rd edition)[M].Beijing:China Architecture and Building Press,2004,39:194-195.(in Chinese)