

饱和黄土场地液化的工程初判和详判指标与方法研究^①

王兰民^{1,2,3}, 袁中夏^{1,4}, 汪国烈⁵

(1. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国地震局黄土地震工程重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 3. 甘肃省岩土防灾工程技术研究中心, 甘肃 兰州 730000; 4. 兰州理工大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730000; 5. 甘肃省建筑科学研究院, 甘肃 兰州 730050)

摘要:黄土液化的判别是工程界长期存疑的问题。本文基于不同黄土场地的现场标贯试验、波速测试和试样的室内动三轴试验研究以及《兰州市区建筑抗震设计规程》(DB62/T25-3037-2006)使用反馈情况,提出了饱和黄土场地液化的工程初判和详判指标与方法:(1)地层年代、粘粒含量、塑性指数、剪切波速、土层埋深条件等可作为饱和黄土场地液化初判的指标;(2)国家《建筑抗震设计规范》(GB 50011-2010)^[2]中基于标贯击数的液化判别公式和液化指数计算公式适用于饱和黄土地基的液化判别和液化程度评价,但黄土液化判别的标贯击数基准值需要修正;(3)对应于设防加速度0.1 g、0.15 g、0.2 g、0.3 g、0.4 g下饱和黄土液化判别的标贯击数基准值应分别为7、8、9、11、13,显著小于砂土液化判别的相应值。目前该判别方法已被纳入《甘肃省建筑抗震设计规程》(DB62/T25-3055-2011)^[3]。

关键词:黄土; 液化; 标贯试验; 剪切波速; 判别方法

中图分类号: TU435

文献标识码: A

文章编号: 1000-0844(2013)01-0001-08

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2013.01.0001

Study on Method for Preliminary and Detailed Evaluation on Liquefaction of Loess Sites

WANG Lan-min^{1,2,3}, YUAN Zhong-xia^{1,4}, WANG Guo-lie⁵

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

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

3. Geotechnical Disaster Prevention Engineering Technology Research Center of Gansu Province, Lanzhou, Gansu 730000, China;

4. Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730000, China;

5. Gansu Province Construction Science Research Institute, Lanzhou, Gansu 730000, China)

Abstract: Loess liquefaction is a disastrous phenomenon which should be carefully treated to reduce the risk. But the relative lacking of both site study results and engineering experience makes it difficult to evaluate liquefaction potential of loess of construction sites. Through many studies carried out since 1990's, the understanding for loess liquefaction is improved substantially. As a result, to incorporate of these studies in seismic code became urgent, but at the same time, new proposals on loess liquefaction often face scrutiny from engineers. In order to resolve the difference between laboratory studies and information obtained from field, the two approaches must be combined and any proposal on evaluation of loess liquefaction should at least sound reasonable by applying field test data, which is the backbone for geotechnical analysis. Based on previous studies, this study carried out experiment in laboratory to get understanding of loess liquefaction be-

① 收稿日期:2013-03-20; 中国地震局兰州地震研究所论著编号:LC2013004

基金项目:国家自然科学基金项目(50978239)

作者简介:王兰民(1960-),男(汉族),研究员,博士生导师,主要从事岩土工程与地震工程方面的研究工作。

havior and the main factors that determined whether the loess sample would liquefy or not. Then using feedbacks from engineers on accept method for loess liquefaction evaluation, field data of saturated loess site were collected, and the liquefaction evaluation method recommended in Chinese "Code for seismic design of buildings" (GB50011—2010) (referred as "national seismic code") was examined to validate its suitability for loess liquefaction. Through all these efforts, it is found that the liquefaction of loess cannot be properly evaluated by using the current liquefaction potential evaluation method in national seismic code. And the laboratory test is good at providing preliminary evaluation information on weather loess will liquefy or not under certain seismic intensity. For detailed evaluation of loess liquefaction, field data interpretation is more reliable. Based on these understandings, the proposed method on loess liquefaction is a two stage evaluation: 1) for Preliminary evaluation of loess liquefaction, the age, clay content, shear velocity, plastic index, degree of saturation should be used to determine weather loess; 2) For detailed evaluation of loess liquefaction, the principles behind the Chinese code for seismic design of buildings are still valid, but the criteria should be modified to reflect the actual field test data from saturated loess site. It is recommended that SPT reference values or N_{60} , as it represented in national seismic code should be reduced and a set of more realistic values which are respectively for design ground motion 0.1 g, 0.15 g, 0.2 g, 0.3 g and 0.4 g should be 7, 8, 9, 11 and 13. This proposal is accepted by expert during the drafting of "Specification for seismic design of building" of Gansu province (DB62/T25—3055—2011), which is a milestone for liquefaction evaluation of loess sites.

Key words: Loess; Liquefaction; Standard penetration test; Shear velocity; Evaluation method

0 引言

在岩土工程领域,黄土被认为是一种特殊土。黄土的这种特殊性一方面是由原生黄土风成沉积以及新近沉积过程中形成的大、中孔隙结构造成的,另一方面也由于黄土的粒度组成形成。黄土中大、中孔隙发育,黄土未完全固结,这使得黄土在天然状态下处于亚稳态,在外界荷载(如地震或工程振动等)及水的作用下容易失稳,发生震陷和湿陷。而以粉粒为主的颗粒组成使得其性质具有“类砂”和“类黏土”的特点。所谓类砂就是黄土能够发生液化。我国和塔吉克斯坦的地震灾害调查表明,马兰黄土和全新世黄土由于其结构疏松,当处于饱和或者近饱和状态时,在地震作用下会发生地基液化震害^[4-5]。Ishihara、白铭学和王兰民等对1900年以来发生在黄土地区的几次地震震害实例调查结果和大量的室内动三轴、动扭剪试验结果表明,饱和和高含水率黄土具有很大的液化势和流态破坏势。当土层中的含水量较高时,相对于砂土,黄土在强度不太高的地震动作用下就会发生液化,从而引起建筑物地基失稳或者斜坡丘陵地带的泥流,造成严重的人员伤亡和财产损失^[6-10]。

袁中夏^[11]通过对黄土液化过程特点的分析,认

为黄土的液化是土的液化中的流滑类型。流滑是指相对松散的无粘性或者弱粘性土在循环荷载作用下,孔压上升,有效应力降低,使其结构发生重组,产生不可逆的大形变最后呈现“流动”状态的现象。发生流滑的土一般与其结构的特殊性有关。如果土的结构松散、存在大量的气封闭孔隙就可能会导致这种情况发生。在干旱环境下生成的黄土土因为通常其结构具有“水敏性”,在饱和条件下土骨架相对不稳定,当循环动荷载作用使得孔隙水压力进一步升高时其结构会发生实质性的改变,在干旱环境中存在的可溶盐类溶解以及孔隙水压力的作用会使多孔性结构崩溃,发生大的残余变形,而孔隙水进入气封闭的孔隙阻止了孔隙水压力上升,最终土样发生流滑变形。当黄土液化时,黄土结构很快失稳,残余变形急剧发生,而孔压增长往往不能达到有效围压。这正是流滑类型液化的特点(图1)。

由于黄土液化的危害性,对其进行评价是工程建设的客观要求。但是,对于工程而言,要引入的评价方法一方面要相对可靠,另一方面还要结合工程实际。王兰民等进行的相关研究提供了黄土液化判别的室内试验基础,特别基于室内动三轴试验方法的黄土液化判别纳入《兰州市区建筑抗震设计规

程》^[1],标志着工程界对黄土液化从 90 年代的持疑已经发展到对其的理解,并提出了工程判别的需求。但是,基于试验研究的黄土液化判别方法虽然提供了一种可行的液化评价方法,但是因建立在以室内动三轴试验和分析计算为基础的 Seed 简化判别法之上,尽管结果较为精确,但试验技术要求高,耗时较长,计算繁琐,难以广泛应用于工程实践之中。特别对于黄土而言,室内试验结果和现场测试数据的结合没有解决,不能不说是缺憾。所以,在《兰州市

区建筑抗震设计规程》中首次提供黄土液化判别方法一方面标志对于黄土液化判别的研究已经具有工程实用价值,另一方面从使用的反馈来看,该规程所提供的方法与工程的结合程度还不太好,也与《建筑抗震设计规程》的液化判别方法没有比较,特别是与现场标贯测试数据没有联系起来,其实际应用受限。而鉴于黄土液化的震例研究较少,多数地区缺乏相关工程经验,所以《建筑抗震设计规范》(GB50011—2010)中未将黄土地基液化判别列入。

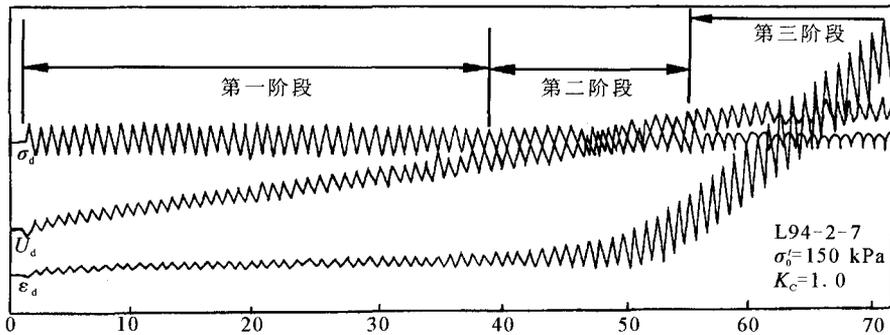


图 1 黄土液化试验中的应力、孔压和应变时程记录^[11]

Fig. 1 Stress, pore water pressure and strain time history during liquefaction test of loess.

为了提出具有工程实用性的黄土地基液化势判别方法,弥补兰州抗规液化判别方法的局限性,同时与《建筑抗震设计规范》相参照,本文利用天水、陇西和靖远的不同黄土场地的现场标贯试验数据,研究了黄土场地标贯击数的分布范围,探讨了饱和度对标贯击数的影响关系。根据研究结果,参考《建筑抗震设计规范》(GB50011—2010)中液化判别标准贯入锤击数临界值的计算方法,对黄土场地液化判别标贯击数基准值进行了修正,进而提出了基于现场标贯试验的饱和黄土地基液化判别方法。

1 黄土场地的初步液化判别方法

进行黄土液化初步判别的最简单也最常用的指标是其形成的地质年代。无论震害实例还是室内研究都发现,年代为 Q_2 及以前的黄土(老黄土)一般不会发生液化。所以,地质年代可以作为黄土液化初判的首要考虑指标。

进一步的黄土液化判别则要考虑具体的黄土物性指标参数。大量的测试数据表明,黄土的液限含水量多在 25%~35%之间,塑性指数多在 8~14 之间。按照土的工程分类标注推荐的塑性图分类方法,黄土实际上分为低液限粉土和低液限黏土两大类。Andrew A. 和 Martin G. 通过研究认为粉土在具有类砂的性质时可以发生液化,而具有类黏土

的性质时,不发生液化^[12]。他们通过数据分析提出了判别粉土是类砂还是类黏土的判别指标。当粉土的液限小于 32 时,具有类砂的性质,而其液限大于 32 时,具有类黏土的性质;就液化势而言,当黏粒含量低于 10%且液限小于 32 时,粉土容易发生液化。当黏粒含量高于 10%但液限小于 32 时,粉土也有发生液化的几率。对黄土而言,判断其是否具有液化势同样需要划定其是类砂还是类黏土。不过,Andrew 的研究结果并不能直接应用到黄土上,因为比照黄土液限的范围,如果采用液限 32%为标准的话,黄土在绝大多数情况下都是类黏土的。根据室内黄土液化试验,黄土的液化势与黏粒含量存在一定的关系。当黄土中的黏粒含量较低时,黏粒含量对黄土液化的影响并不显著。这是因为当黄土结构中的黏粒含量较低时,黏粒主要附着在粉粒上存在,黏粒并没有起到胶结的作用。只有当黏粒含量较高时,这时才会有大量的黏粒充填在粉粒形成的孔隙之间形成胶结。当黏粒含量大于 10%时,随着黏粒含量的增加,黄土的液化势降低。按照国家抗震设计规范的方法,同时参考黄土液化试验的结果,建议基于黄土中黏粒含量百分率的黄土液化判别标准为:当黄土中黏粒含量百分率在烈度Ⅶ度,Ⅷ度和Ⅸ度时分布不小于 12, 15 和 18 时,可不考虑液化影响。

在目前还没有足够的黄土液化震害实例的情况下,基于非液化土层厚度、地下水位深度和基础埋深的初判方法应当在黄土液化判别中继续采用,因为基于这些因素的黄土液化影响评价在规律上应当是一致的。

2 黄土现场标贯试验结果

由于《建筑抗震设计规范》所提出的液化判别方法主要基于砂土和粉土地液化的标贯数据,有关黄土地液化的标贯数据相对较少。这也是造成目前关于黄土液化判别的方法相对不够成熟的原因。所以,如何根据黄土场地标贯数据进行黄土场地液化详判是目前黄土液化判别研究需要解决的主要问题。

本研究选取天水、陇西和靖远三地区不同场地上的60组SPT测试数据进行分析,图2是这60组黄土地标贯值与饱和度的关系。可以看出,黄土地场的标贯击数分布在1.8~14这个范围内。随着场地条件和土质的不同标贯击数存在比较大的差异。考虑到在液化判别中认为饱和度达到0.7左右即可认为场地存在液化可能,选择饱和度0.7为临界值,将黄土地场分为饱和黄土地($S_r \geq 0.7$)和非

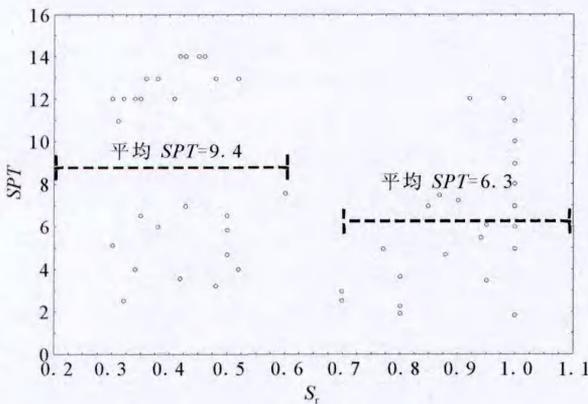


图2 黄土地标贯值分布

Fig.2 Distribution of SPT values of loess ground.

饱和黄土地($S_r < 0.7$)来对标贯击数进行分类。计算标贯平均值,可以得到非饱和黄土地的平均标贯击数为9.4,而饱和黄土地的平均标贯击数为6.3。就分布范围而言,饱和黄土地场的标贯值在1.8~12之间,分布范围小。饱和黄土地场的标贯击数差异说明黄土地场的强度存在很大差异,因此其抗液化的强度也会有很大的差异。

对饱和黄土地标贯值的分布进行分析得到如

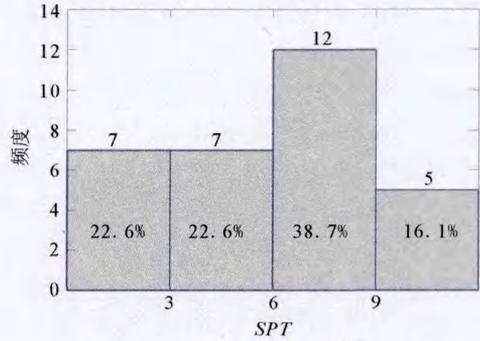


图3 饱和黄土地标贯值频度分布

Fig.3 Frequency of SPT value distribution for saturated loess site.

图3所示的结果。可以看出,以6为界,饱和黄土地标贯值大约一半在6以下,一半在6以上。如果以9为界,则84%的场地标贯值小于9。这个数据与砂土相比明显是比较低的。

3 饱和度和深度对黄土地标贯击数影响的分析

为了考察黄土地土层深度对标贯击数影响,绘制了上述不同场地的标贯击数—饱和度—土层深度三维曲面图(图4)。由图中可以看到,多数数据表明黄土地标贯击数随着饱和度的增加而有所增加,随着深度的加深也会有所增加。但是这个规律

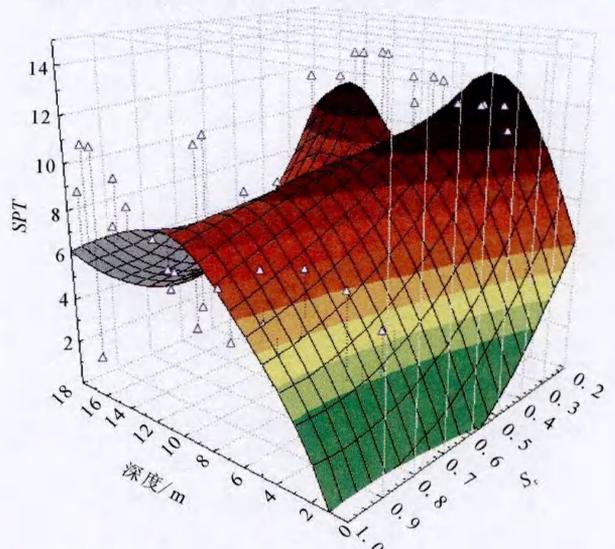


图4 不同土层深度和饱和度下黄土地标贯值的分布情况

Fig.4 SPT values of saturated loess site with different depths and degrees of saturation.

比较离散。因为随着黄土的粒度构成、地质年代、埋藏条件以及结构性的差异,黄土的标贯击数与深度和饱和度并不具有很好的对应关系。对深度而言,对于土质均匀的场地,黄土场地的标贯击数应当随着深度而有所增加。但是,如果土层的饱和度不同、深部土层的粒度组成不同,也会出现相反的情况。对于饱和度而言,如果黄土的塑性指数不同、密度不同,标贯击数与饱和度的关系也无从比较。

4 饱和黄土标贯击数与其它土类的对比

国家《建筑抗震设计规范》的液化判别方法最初是建立在我国东部若干震例之上,特别是邢台和唐山大地震后场地的现场测试数据上的。以后根据研究的进展又做了若干修正。但是缺乏黄土地液化现场调查资料造成对黄土液化判别的困难。那么,国家抗规提供的液化判别方法能否直接应用在黄土场地上,首先需要对黄土场地标贯击数与其他类型的场地进行比较,以探讨黄土和其它土类标贯值的差别。本文将同样从天水、陇西和靖远三地收集到的不同饱和场地的 SPT 数值标示如图 5。

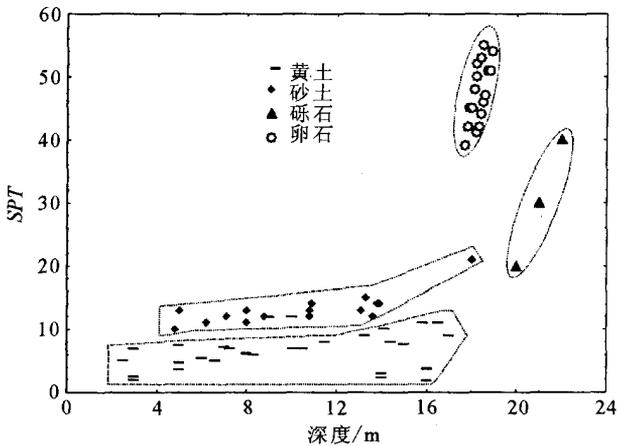


图 5 不同饱和土场地的标贯值

Fig. 5 SPT values of saturated layers of different soils.

由图 5 可知,从黄土到砂土、到砾石到卵石,其标贯击数依次增加。只有饱和砂土场地的标贯击数相对接近饱和黄土场地的标贯值。但是二者仍然是区分开来的,因为只有饱和砂土标贯击数的下限值(10~12 左右)与饱和黄土场地标贯击数的上限值接近(也是 10~12 左右)。进一步将各类土的标贯击数进行统计分析,得到如表 1 所示的结果。

通过表 1 可以看出,砂土、砾石土和卵石的标贯击数均值分别为黄土的 2.1 倍、4.7 倍和 7.5 倍。由此可见,黄土的标贯击数明显低于其他土类,即便与最为接近的砂土相比差距仍然是很大的。

表 1 不同饱和土层的标贯值比较

Table 1 SPT value comparison among saturated layers of different soils

土类	最小标贯值	最大标贯值	均值
黄土	1.8	12	6.3
砂土	10	21	13.1
砾石	20	40	30
卵石	39	55	47.4

5 基于 SPT 的黄土地基液化判别方法

《建筑抗震设计规范》中对深度范围在 20 m 内饱和砂土和粉土的液化判别标准贯入锤击数临界值按照式(1)计算:

$$N_{cr} = N_0 \beta [\ln(0.6d_s + 1.5) - 0.1d_w] \sqrt{3\rho_c} \quad (1)$$

式中, N_{cr} 为液化判别标贯击数临界值; N_0 为液化判别标贯击数基准值,具体见表 2《建筑抗震设计规范》中推荐的液化判别标贯击数基准值参考值; d_s 为饱和土标准贯入点深度(m); d_w 为地下水位(m); ρ_c 为黏粒含量百分率,当小于 3 或者为砂土时取 3; β 为调整系数,设计地震第一组取 0.80、第二组取 0.95、第三组取 1.05。

表 2 液化判别标贯击数基准值参考值

Table 2 Reference SPT values for liquefaction evaluation

设计加速度/g	0.1	0.15	0.20	0.30	0.40
液化判别标贯击数基准值	7	10	12	16	19

按照公式(1)对收集到的黄土数据进行液化判别计算得到的结果如表 3。据表可知,(1)所有场地中仅有两个标贯击数为 12,且黏粒含量大于 14 的场地判定为不液化。从所有场地的数据来看,这两个场地的标贯击数是最高的,黏粒含量也相对较高。(2)对浅层、黏粒含量较高的场地计算出来的临界标贯值比较低,多在 10 以内。而在黏粒含量较低时,土层较所得到的标贯值临界值很大,超出了目前收集到的饱和黄土地标贯值的范围。因此,利用《建筑抗震设计规范》推荐的方法直接进行黄土液化的详判时,计算得到的液化判别临界标贯击数值偏大,造成几乎所有的测试点都被判定为液化场地。

将黄土地实测标贯值和计算得到的液化判别标贯临界值进行对比得到图 6 所示结果。可以看出,如果采用规范的计算方法的话,几乎所有的饱和($S_r > 0.7$)黄土地都会被判定为液化场地。而全部计算结果中 N_{cr} 的平均值为 9,这是饱和黄土地平均标贯击数的 150%。从根本上讲,发生液化的黄土地应当是相对疏松的黄土地,因此至少在地震动作用强度不是太高的情况下,可能发生液化

的黄土场地的平均标贯值应当小于全部饱和黄土场地的标贯击数的均值。因此,直接将《建筑抗震设计规范》推荐的方法用于黄土液化判别造成的判别结果有所夸大,不宜直接采用。

表3 利用国家抗震设计规范方法的黄土地液化详判结果

Table 3 Result of detailed liquefaction evaluation based on Chinese National Seismic design code

点号	是否液化	实测 SPT	N_{cr}	β	N_0	d_s	d_w	ρ_c
1	液化	3	7	0.95	16	14	16.4	6
2	液化	3.7	8.2	0.95	16	16	16.4	6
3	液化	2.3	7.4	0.95	16	14	16	6
4	液化	1.8	8.7	0.95	16	16	16	6
5	液化	2.3	7.4	0.95	16	14	16	6
6	液化	1.8	13.3	0.95	16	6	5	5
7	液化	7.6	14.6	0.95	16	7	5	5
8	液化	3.5	6.9	0.95	16	5	6	12
9	液化	7	8.7	0.95	16	7	6	12
10	液化	1.9	4.5	0.95	16	3	6	12
11	液化	5.5	7.8	0.95	16	6	6	12
12	不液化	12	9.4	0.95	16	9	6	14
13	液化	2.5	4.2	0.95	16	3	6	14
14	液化	4.7	6.4	0.95	16	5	6	14
15	液化	6.1	8.7	0.95	16	8	6	14
16	液化	5	3.4	0.95	16	4	6	15
17	液化	7.5	6.1	0.95	16	5	6	15
18	液化	7.2	7.8	0.95	16	7	6	15
19	不液化	12	9.6	0.95	16	10	6	15
20	液化	5	7.6	1.05	12	6.6	6	10
21	液化	7	10	1.05	12	10.5	6	10
22	液化		9	11.4	1.05	12	13.3	6
23	液化	11	12.4	1.05	12	15.8	6	10
24	液化	6	8.8	1.05	12	8.3	6	10
25	液化	8	10.5	1.05	12	11.5	6	10
26	液化	8	11.8	1.05	12	14.4	6	10
27	液化	9	12.8	1.05	12	17	6	10
28	液化	7	8.1	1.05	12	7.3	6	10
29	液化	7	9.8	1.05	12	10.1	6	10
30	液化	10	11.7	1.05	12	14.1	6	10
31	液化	11	12.7	1.05	12	16.5	6	10

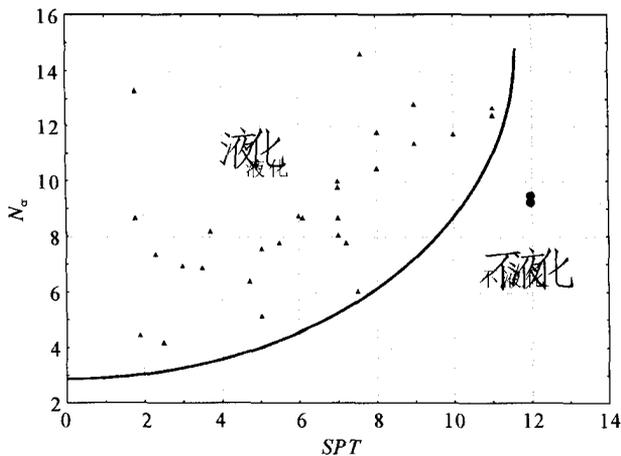


图6 黄土场地实测标贯击数和液化判别标贯临界值的对比

Fig. 6 Comparison between SPT value of saturated loess sites and calculated N_{cr} .

鉴于以上原因,需要对《建筑抗震设计规范》中推荐的液化详判方法进行修正才能使其适用于黄土场地。修正该方法最简单的途径就是提出针对黄土场地的液化判别标贯击数临界值,即通过调整 N_{cr} 值就可以使该详判方法对黄土的适用性提高。综合黄土现场标贯试验、室内试验研究结果及其与砂土标贯击数的对比分析,作者在参与编制《甘肃省建筑抗震设计规程》中给出了适用于黄土液化势判别的标贯击数基准值,如表4所示。

表4 黄土地基液化判别标贯击数基准值参考值^[3]

Table 4 Reference SPT values for detailed evaluation of liquefaction of loess sites

设计加速度/g	0.1	0.15	0.20	0.30	0.40
液化判别标贯击数基准值	7	8	9	11	13

采用表4建议的黄土地基液化判别标贯击数基

准参考值,重新对表 3 中的数据进行计算,得到黄土场地液化点判别情况如表 5。

表 5 采用建议黄土地基液化判别标贯击数基准值参考值后的液化判别结果

Table 5 Liquefaction evaluation results using recommend reference SPT value for loess sites

设计加速度/g	0.1	0.15	0.20	0.30	0.40
液化判别标贯击数基准值	7	8	9	11	13
判定为液化的比例/%	19	26	48	71	84
平均液化判别临界标贯击数 N_{cr}	4.5	5.2	5.8	7.1	8.4

可以看出,采用建议的黄土地基液化判别标贯击数基准参考值后,黄土场地液化判别的结果相对比较合理,反映了在地震烈度不高时(≤ 0.20 g)时,具有液化势的黄土地比例并不太高。

在利用 SPT 的黄土地基液化判别基础上,可以进一步利用《建筑抗震设计规范》中液化指数判别的方法进行场地液化等级的计算。因为,此时 N_{cr} 已经经过修正,所以黄土场地液化指数计算公式不必修正。

6 结论与讨论

(1) 黄土的结构和粒度特征使其工程性质较为特殊,视黄土粒度和结构的不同,黄土的工程性质表现为类砂或类黏土。黄土液化是黄土类砂的土力学性质,因此在利用土层年代的基础上,可以利用黏粒含量来进一步判别黄土在一定设计地震动作用下是否发生液化。

(2) 对黄土场地标贯击数的分析表明,黄土的标贯击数与埋藏深度和饱和度有一定的关系,但是因黄土类型和应力历史的不同,这种规律性较为离散。

(3) 饱和黄土的标贯击数与砂土、砾石土和卵石的标贯击数存在明显的差别。特别是饱和黄土场地的标贯击数均值仅相当于饱和砂土的 48%,因此对饱和黄土的液化详判应当与饱和砂土有所差别。

(4) 利用《建筑抗震设计规范》中对于砂土和粉土液化判别标准贯入锤击数临界值进行黄土场地的液化判别发现判别结果有所夸大。但是从判别的原理上来说,《建筑抗震设计规范》推荐的方法还是适用的,但需要对判别标贯击数基准值进行修正。

(5) 由于黄土地基和场地液化的实例较少,本文根据综合认识,提出了适用于黄土的液化判别标贯击数基准值,并被纳入《甘肃省建筑抗震设计规程》。这个建议得到的黄土场地液化判别结果相对合理。

(6) 需要强调的是,鉴于目前黄土液化震害实例较少,而且目前黄土地基液化判别工作在多数地区并未开展,目前的研究结果大多数还是建立在室内试验研究的基础上,因此即便采用本文推荐的方法进行黄土场地液化的判别其结果仍然有待工程实践的进一步检验。而在研究领域,今后需要考虑采用振动台和岩土离心机进行模型试验,设计不同工况,对饱和黄土土体进行液化试验,以期对论文研究结果更快地进行土体检验。

[参考文献]

- [1] 甘肃省建筑科技专家委员会. 兰州市区建筑抗震设计规程(DB 62/T25-3037-2006)[S]. 兰州:[s. n.],2006
Expert Committee on Construction Science and Technology of Gansu province. Specification for Seismic Design of Buildings for Lanzhou Urban Area (DB 62/T52 -- 3037 - 2006) [S]. Lanzhou:[s. n.],2006
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规程 (GB 50011-2010)[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.
Ministry of Housing and Urban-rural Development. Code for Seismic Design of Buildings (GB 50011-2010)[S]. Beijing: China Architecture & Building Press,2010.
- [3] 甘肃省建筑科技专家委员会. 甘肃省建筑抗震设计规程(DB 62/T25-3055-2011)[S]. Lanzhou:[s. n.],2011.
Expert Committee on Construction Science and Technology of Gansu Province. Specification for Seismic Design of Buildings (DB 62/T52-3055-2011)[S]. Lanzhou:[s. n.],2011.
- [4] 王兰民,等. 黄土动力学[M]. 北京:地震出版社,2003.
WANG Lan-min, et al. Loess Dynamics[M]. Beijing: Press of Seismology,2003.
- [5] 石兆吉,王兰民. 土壤动力特性—液化势及危害性评价[M]. 北京:地震出版社,1999.
SHI Zhao-ji, WANG Lan-min. Dynamic Property of Soil-liquefaction and Risk Evaluation[M]. Beijing: Press of Seismology, 1999.
- [6] 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.
- [7] 白铭学,张苏民. 高烈度地震时黄土地层的液化滑移[J]. 工程勘察, 1990,20(1):1-5.
BAI Ming-xue, ZHANG Su-min. Liquefaction Induced Slide of Loess Layer under High Seismic Intensity [J]. Geotechnical Survey, 1990,20(1):1-5.
- [8] 王峻,李兰. 俄罗斯伊尔库茨克地区黄土动力特性实验研究 [J]. 西北地震学报,2001,23(3):286-290.
WANG Jun, LI Lan. The Laboratory Study on Dynamic Characteristics of Loess in IRKUTSK, Russia [J]. Northwestern Seismological Journal, 2001,23(3):286-290.
- [9] 王谦,袁中夏,王兰民,等. 汶川地震后甘肃临夏北塬黄土地

- 大面积沉降研究[J]. 西北地震学报, 2012, 34(2): 180-185, 2012.
- WANG Qian, YUAN Zhong-xia, WANG Lan-min, et al. Study on Large-scale Subsidence of Loess Site after Wenchuan $M^8.0$ Earthquake in Beiyuan, Linxia County, Gansu Province[J]. Northwestern Seismological Journal, 2012, 34(2): 180-185, 2012.
- [10] 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): 89-94.
- WANG Lan-min, LIU Hong-mei, LI Lan, et al. Laboratory study on Mechanism and Characteristics of Loess Liquefaction[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(1): 89-94.
- [11] 袁中夏, 王兰民, Susumu Yasuda. 黄土液化机理和判别标准的再研究[J]. 地震工程与工程振动, 2004, 24(4): 164-169.
- Yuan Zhong-xia, Wang Lan-min, Susumu Yasuda. Further Study on Mechanism and Criteria of Loess Liquefaction[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2004, 24(4): 164-169.
- [12] Desmond Andrews, Geoffrey Martin. Criteria for Liquefaction of Silty Soils[A]// 12th International on Earthquake Engineering[C]. Auckland, New Zealand: [s. n.], 2000.
- [13] 刘奉银, 赵静源, 贾凯, 等. 西安黄土新型旋转触探试验研究[J]. 西北地震学报, 2011, 33(2): 239-242.
- LIU Feng-yin, ZHAO Jing-yuan, JIA Kai, et al. A New Rotary Penetration Test on Xi'an Loess[J]. Northwestern Seismological Journal, 2011, 33(2): 239-242.
- [14] 王志杰, 骆亚生, 谭东岳, 等. 干密度对预剪应力下重塑黄土动力特性影响的试验研究[J]. 西北地震学报, 2011, 33(4): 349-353.
- WANG Zhi-jie, LUO Ya-sheng, TAN Dong-yue, et al. Experimental Study on the Effects of Dry Density on Dynamic Properties of Remodeled Loess under Condition of Pre-shearing Stress[J]. Northwestern Seismological Journal, 2011, 33(4): 349-353.
- [15] 王爱国, 赵泽贤. 陇东黄土高原地区建筑抗震设防参数研究[J]. 西北地震学报, 2012, 34(1): 78-83.
- WANG Ai-guo, ZHAO Ze-xian. Study on the Seismic Fortification Parameters in the Loess Plateau of Eastern Gansu Province[J]. Northwestern Seismological Journal, 2012, 34(1): 78-83.