文章编号: 1007 - 6069(2011) 01 - 0153 - 04

关于软弱粉质粘土地震液化或震陷的判别标准

辛鸿博[1],周锡元[2]
(1. 中冶建筑研究总院,北京 100088; 2. 中国建筑科学研究院,北京 100013)

摘　要: 文中简要介绍了判别细粒土地震液化分析方法的发展历程,指出了工程建设中考虑细粒土地震液化问题的必要性。基于已有研究成果,阐述了可用于工程设计的软弱粉质粘土地震液化简化判别方法,并对建筑抗震设计新规范中增加的相关条款进行了说明解释。

关键词: 细粒土; 地震液化; 界限含水量; 简化判别法
中图分类号: TU435; P315. 98　　**文献标志码**: A

On liquefaction criteria of low plasticity fine soils

XIN Hongbo[1], ZHOU Xiyuan[2]

(1. Central Research Institute of Building and Construction, MMC, Beijing 100088, China;
2. China Academy of Building Science, Beijing 100013, China)

Abstract: Liquefaction of low plasticity fine soils is observed during past earthquakes. It shall bear in mind at investigating seismic safety of engineering site that evaluation of liquefaction potential is carried out of the fine soils and the effective measure of liquefaction mitigation is taken. Based on recent earthquake discovery and research developments, the liquefaction criteria are suggested of the fine-grained soils to Chinese code for seismic design of buildings.

Key words: fine soils; liquefaction; Atterberg limits; simplified method

引言

与砂土地震液化相比,人们对细粒土地震液化或震陷问题的关注和研究要少得多,时间也比较晚。较早注意到此问题,而且展开系统研究的是我国学者汪闻韶先生。汪先生根据 1961 ~ 1976 年我国 4 次大地震中的震害首次提出了少粘性土(细粒土) 地震液化的简易判别方法[1]。1978 年,此方法写入了我国第一部水工抗震设计规范 SDJ 10 - 78(试行) [2],得到了国际岩土工程界的认同和广泛注意,成为时至今日国际上判别粘性土液化唯一可遵循的工程标准,国际上称之为中国方法。此地震液化简易判别方法,已纳入我国行业标准《水工建筑物抗震设计规范》SL203 - 97 和国家标准《水利水电工程地质勘察规范》GB50287 - 99 之中[3,4]。

1989 年 Loma Prieta 地震、1994 年 Northridge 地震、特别是 1999 年 Kocaeli 地震和集集地震之后,细粒土在地震中的变形和失效问题引起了美欧学者的高度重视,并对其进行了深入探讨,得到了较为一致的结论。其代表性人物有: J. D. Bray、R. B. Seed、I. M. Idriss 和 G. R. Martin。纵观他们的研究成果,发现除进行局部修正外,众多专家建议的细粒土地震液化判别方法在一定程度上继承了汪先生考虑问题的思路和评价标准。

作为国标 GB50011 修订的背景资料,文中简要叙述了细粒土地震液化或震陷简易判别方法的代表性研

收稿日期: 2010 - 09 - 16;　**修订日期**: 2011 - 02 - 16

作者简介: 辛鸿博(1962 -) ,男,教授级高级工程师,主要从事动力学与土工抗震方面的研发工作. E-mail: hbbxin@ yahoo. cn

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

究成果,并对相关的新增条款做一点补充说明。

1 国内外研究现状

1.1 汪闻韶方法

汪闻韶先生是较早关注少粘性土(细粒土) 地震液化或震陷问题的专家。他在系统分析研究了我国巴楚地震、邢台地震、海城地震和唐山地震中 59 个场地的少粘性土地震液化问题后,于 1978 年提出了关于此类土的地震液化判别实用标准。汪先生认为,满足下式的饱和少粘性土,地震时可能会发生液化。这一判别标准,可称之为界限含水量法。

$$W_S \geq (0.9 \sim 1.0) W_L \tag{1}$$

或

$$I_L \geq 0.75 \sim 1.0 \tag{2}$$

式中,W_s 为饱和含水量,W_L 为液限含水量,I_L 为液性指数。

此简易判别法一经提出,就得到了地震岩土工程界的认同。1982 年,Seed 和 Idriss 关于地震液化问题的著作[5] – Ground Motions and Soil liquefaction during Earthquakes,就将汪闻韶先生的方法作为粘性土地震液化的判别标准。1996 年,美国布法罗国家地震工程研究中心(NCEER) 组织 21 位国际知名的地震液化问题专家聚集盐湖城,在 Youd 和 Idriss 教授的主持下,对 Seed-Idriss 简化判别法再次进行了改进与完善(此后,不少人将此次改进后的 Seed-Idriss 简化判别法称之为 NCEER 方法) ,其推荐的粘性土地震液化判别方法亦为汪先生提出的简化标准[6]。我国将汪先生的少粘性土地震液化判别法纳入行业标准最早的是,水利电力部的《水工建筑抗震设计规范》SDJ 10 – 78。1999 年,国家标准《水利水电工程地质勘察规范》GB50287,也规定采用此方法进行少粘性土的地震液化判别,即规定: 满足下式的饱和少粘性土,可判为可能液化土。

$$W_S \geq 0.9 W_L \tag{3}$$

或

$$I_L \geq 0.75 \tag{4}$$

1.2 J. D. Bray 的建议

Bray 等通过对 Northridge、集集和 Kocaeli 地震中细粒土的震害调查和现场及室内试验研究后,认为界限含水量是判别细粒土地震液化的有效指标,并提出了判别细粒土地震液化的如下标准[7, 8]:

$W_S/W_L < 0.8$ 的细粒土,为非液化土。

$I_P < 12$ 的细粒土,如果 $W_S/W_L > 0.85$,则判为液化土。

$12 < I_P < 18$ 的细粒土,如果 $W_S/W_L > 0.8$,强震时亦可液化。

式中,I_P 为塑性指数。

1.3 R. B. Seed 的建议

Seed 等亦根据集集和 Kocaeli 地震的震害资料,建议工程建设中可采用下列标准进行细粒土的地震液化判别[9]:

$I_P < 12$、$W_L < 37$ 的细粒土,如果 $W_S > 0.8 W_L$,则判为液化土。

$12 \leqslant I_P < 20$、$37 \leqslant W_L < 47$ 的细粒土,如果 $W_S \geq 0.85 W_L$,需要进行试验研究,进一步判别。

1.4 G. R. Martin 的建议

Martin 等的建议与 Bray 和 Seed 等的略有不同,在判据中,Martin 等增加了土的粒度限制条件,他们以胶粒含量作为另一个控制指标,认为[10]:

胶粒含量小于 10% 的细粒土: 若 $W_L < 32$,则判为液化土; 若 $W_L \geq 32$,是否液化,需要进一步研究。

胶粒含量大于 10% 的细粒土: 若 $W_L \geq 32$,则判为非液化土; 若 $W_L < 32$,是否液化,仍需进一步研究。

1.5 I. M. Idriss 的建议

判别细粒土是否地震液化,Idriss 等的建议与上述 4 种方法均不同,他们抛开采用物理性能指标的思路,

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

提出了类似于 Seed-Idriss 砂土地震液化简化判别法的分析方法[11]。他们认为: 塑性指数 $I_P<7$ 的细粒土,在地震荷载作用下,其响应类似于砂土; $I_P\geqslant 7$ 的细粒土,其表现则类似于粘土。约 20 年前,文中第一作者等在研究尾矿土的动力特性时就注意到了此种现象的存在,并得出在循环荷载作用下,尾矿土出现“负孔压”的周次随试样塑性指数的增加而增多,强度随塑性指数的增加而提高的结论[12]。

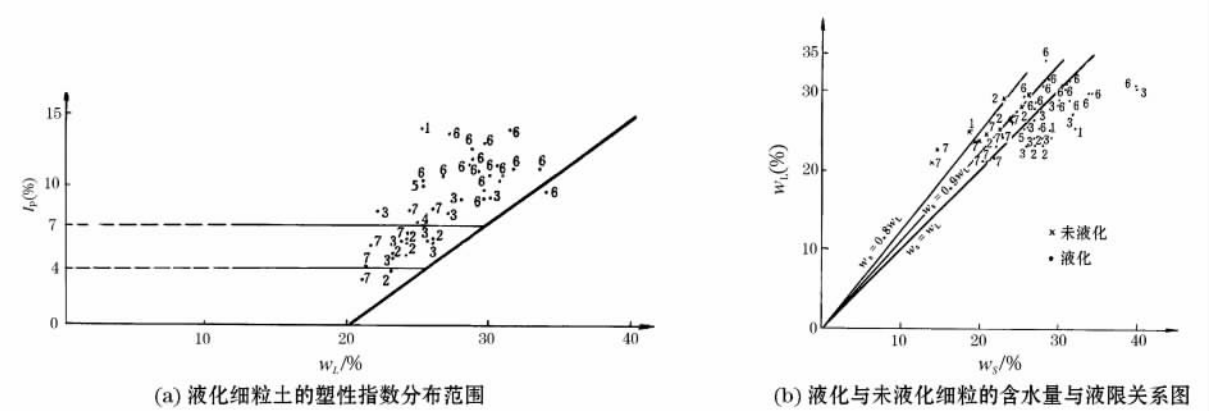
根据上述划分原则,Idriss 等建议: 对于类似于砂土的细粒土,判别其地震液化的方法可采用 Seed – Idriss 简化法; 对于类似于粘土的细粒土,可采用他们新提出的分析方法进行判别[11]。

2　对新规范有关条文的说明

震害调查和试验研究均已证明,地震时饱和细粒土有发生液化或震陷的可能。由于在《建筑抗震设计规范》GB50287 – 2001 中,关于液化土判别的条款,已包含了对部分细粒土即粉土的判别,在 2010 年修订版中新增条款仅是针对比粉土还要细的细粒土而制订的。

我们知道,汪闻韶判别方法的适用范围是少粘性土,其少粘性土指的是: 塑性指数 $I_p\geqslant 3$ 的砂壤土、粉质砂壤土、轻壤土和轻粉质壤土。图 1 示出了汪先生研究少粘性土地震液化时所使用的资料,它给出了液化少粘性土的塑性指数和液限的分布范围以及液限与含量的关系,图中数字代表场地的编号。

由图 1 可知,汪先生所研究的少粘性土是那些塑性指数 I_p 小于 15 且不小于 3 的细粒土。根据我国现行标准《岩土工程勘察规范》GB50021 和《建筑地基基础设计规范》GB50007 的规定,$I_p\leqslant 10$ 的细粒土为粉土, $10<I_p<15$ 的应定名为粉质粘土。



(a) 液化细粒土的塑性指数分布范围　　(b) 液化与未液化细粒的含水量与液限关系图

图 1　液化少粘性土在塑性图的分布

Fig. 1　Characteristics of liquefied fine soils

鉴于细粒土的动力特性和其液化对建(构) 筑物造成的破坏,我们认为在理想建设场地越来越少的走势下,为提高抗震防灾水平,有必要在抗震设计规范中增加对存在 $I_p<15$ 的饱和粉质粘土地基进行地震液化或震陷判别的相关规定,并应遵循科学、简便和可行的原则选择比较适宜的方法。

综合考虑上述各节中有关细粒土地震液化或震陷的研究和所提出的判别标准,我们认为在当前的认知水平下,采用已使用多年的物理性能指标法作为判据较为适宜。考虑到我国与美欧等国家在试验方法上的差异,以及细粒土特别是塑性指数相对较高的细粒土液化和震陷多发生在强震高烈度区的特点,新规范中增加了有关饱和粉质粘土地震液化判别的如下条文:

“4.3.11 地基中软弱粘性土层的震陷判别,可采用下列方法。软土震陷的危害性和抗震措施,可根据沉降和横向扩展等因素研究确定。8 度(0.3g) 和 9 度时,塑性指数小于 15 且符合下式之一的饱和粉质粘土,可判为震陷性软土。”

$$W_S\geq 0.9W_L \qquad (4.3.11-1)$$

$$I_L\geq 0.75 \qquad (4.3.11-2)$$

众所周知,土是否发生地震液化,除取决于自身固有特性外,还与所遭受的地震动特性(频谱、峰值、持续时间和大振幅的循环次数) 有关。通常,同一场地在不同地震作用下,其响应和震害程度均不同。这意味

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

着,一个理想的判别方法应该能同时考虑这些要素。由于地震动的不确定性以及土的复杂性,目前的简化法都还没有作到。我国1974和1978版抗震设计规范的判别式仅考虑了宏观烈度的影响,1989版规范提出了近震和远震的概念,2001版规范将近震、远震改为了设计地震分组,这此修订在保留设计地震分组的基础上又做了改进。这样处理虽然远不尽完美,但笔者认为,它们抓住了不同认识阶段问题的主要矛盾,作为工程标准是合理可行的。

规范新增条款关注和考虑的是高烈度地区细粒土的地震液化或震陷问题。和砂土的判别法相比,新增条款4.3.11更原则了一些,这也反映出了现阶段对低塑性粘土的简化判别还考虑不了地震动频谱、峰值和持时等影响因素的现实。但是,它的建立和所揭示的震害现象,依据是较充分和翔实的。新版抗震设计规范中的公式(4.3.11)依据了8次历史地震资料,其震级包括M6.8、M7.3、M7.8和M_w6.9、M_w6.7、M_w7.4、Mw7.6,场地有7度、8度、9度强和水平峰值加速度0.24g、0.35g、0.38g、0.45g、0.51g等。需要指出,虽然依据比较充分,但和砂土的判别方法一样,式(4.3.11)仅适用于一般工程的判别。对于重要工程尚应通过专门研究,综合分析并结合实际情况制定消除和减轻细粒土地基震陷的工程措施。

关于2010版抗震设计规范新增条款第4.3.11条是否会增加了岩土工程勘察的工作量的问题,这里可以做一些说明。由于测试土的含水量和界限含水量是岩土工程勘察工作的常规内容,因此新增条款第4.3.11条既不会增加野外的工作量,也不增加室内试验的工作量,只是要求岩土工程师在整理资料和编写报告时关注这些指标并作出判断。当然,如果地基中的软弱饱和粉质粘土有液化和震陷的可能,则需要增加制定加固处理方案的工作,而这正是保障建设工程地基抗震稳定性所需要的。

3 结论

(1) 软弱粉质粘土,强震时易发生较大的强度损失,甚至出现液化,这一问题应引起岩土工程师的关注。

(2) 与砂土相比,塑性指数相对低的细粒土,其动力响应相对复杂。作为工程中的实用方法,可采用界限含水量法对塑性指数小于15的饱和粉质粘土,进行液化或震陷判别。和规范中砂土的判别方法相同,对于重要工程,尚需进行深入研究,综合判定可能出现的震陷危害,制定防御措施。

(3) 虽然新增软弱粉质粘土震陷判别条款不涉及地震动强度和特性,但考虑到高烈度地区细粒土地震液化或震陷可能性比较大,问题相对也比较严重,规范中增加此条款是十分必要的。新增条款第4.3.11条根据比较充分,判别方法合理可行,其适用范围为8度(0.3g)及以上的地区。

参考文献

[1] 《汪闻韶院士土工问题论文集》编委会,汪闻韶院士土工问题论文集[M].北京: 中国建筑工业出版社,1999,30-45.
The committee of the selected works on geotechnical engineering of academician Wang Wenshao. Selected works on geotechnical engineering of academician Wang Wenshao [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1999.

[2] SDJ 10-78 水工建筑物抗震设计规范(试行) [S].
SDJ 10-78 Specifications for Seismic Design of Hydraulic Structures [S].

[3] SL 203-97 水工建筑物抗震设计规范 [S].
SL 203-97 Specifications for Seismic Design of Hydraulic Structures [S].

[4] GB50287-99 水利水电工程地质勘察规范 [S].
GB50287-99 Code for Water Resources and Hydropower Engineering Geotechnical Investigation [S].

[5] Seed, H. B. and Idriss, I. M.. Ground motions and soil liquefaction during earthquakes[M]. EERI Monograph, Berkeley, Calif,1982.

[6] Youd, T. L. and Idriss I. M.. Summary report of the 1996 NCEER workshop on evaluation of liquefaction resistance of soils[C]//Salt Lake City, Utah,1997.

[7] Bray, J. D.,Sancio, R. B.. Liquefaction susceptibility of fine-grained soils[C]//11th ICSDEE & 3th ICEGE, 2004,655-662.

[8] Bray, J. D.,Sancio, R. B.. Assessment of the liquefaction susceptibility of fine-grained soils[J]JGGE, ASCE,2006,1165-1177.

[9] Seed, R. H.,Recent advances in soil liquefaction engineering[C]//26th Annual ASCE Seminar, CA,2003.

[10] Andrew, D. A.,Martin, G. R.. Criteria for liquefaction of silty soils[C]//Proc., 12th WCEE, NZ, Paper 0312,2000.

[11] Boulanger, R. W.,Idriss, I. M.. Evaluating the potential for liquefaction or cyclic failure of silts and clays[R]. Rep. UCD, Calif,2004.

[12] 辛鸿博,王余庆. 大石河尾矿粘性土的动力变形和强度特征[J]. 水利学报,1995, 11:56-62.
XIN Hongbo, WANG Yuqing. Strength and deformation of Dashile slimes [J]. Chinese Journal of Hydropower Engineering, 1995, 11: 56-62.

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net