

关于剪切波速判别饱和砂土层 震动液化方法的改进

刘国辉¹, 陈利², 周淑敏¹, 贾学民¹

(1. 石家庄经济学院, 河北 石家庄 050031; 2. 水利部河北水利水电勘测设计研究院, 天津 300250)

摘要: 针对目前剪切波速判别饱和砂土层震动液化方法中存在的问题, 提出了结合场况条件计算临界剪切波速的改进式。实例应用表明改进方法更具有合理性。

关键词: 剪切波速; 液化判别; 场况条件

中图分类号: TU435

文献标识码: A

文章编号: 1000-0844(2005)03-0220-03

Improvement on the Method of Sheave Wave Velocity to Value Liquefaction of the Saturated Soil

LIU Guo-hui¹, CHEN Li², ZHOU Shu-min¹, JIA Xue-min¹

(1. Shijiazhuang University of Economics, Shijiazhuang 050031, China; 2. Hebei Investigation, Design and Research Institute of Water Resources and Hydropower, Ministry of Water Resources, Tianjin 300250, China)

Abstract: The problems about the method of shear wave velocity to value the liquefaction of the saturated soil are discussed. Combining with the site condition a improved formula is proposed to calculate the critical shear wave velocity. Case study shows that improved method has move reasonable advantage in use.

Key words: Shear wave velocity; Liquefaction appraisal; Site condition

1 问题的提出

在建筑场地进行地震安全评价中, 对饱和砂土、级配不良的砂卵石、粉土及粉质粘土(以下简称饱和土层)等土层的液化判别是十分重要的内容。其中, 用剪切波速判别饱和土层液化的方法是以土在地震作用下的剪应变量为液化判别的基本量, 利用虎克定律导出其间接判别量——临界剪切波速。由于该判别量稳定性较好, 可在土层原位状态下通过测试的方式得到, 因而近几年来在一些行业被应用^[1]。

该方法通常利用 PS 测井技术获取场地内各土层的剪切波速 V_s 值, 根据场区的抗震设防烈度和建筑物设防标准, 由典型公式(1)计算出各饱和土层震动液化判别点处的临界剪切波速 V_{sl} 。即

$$V_{sl} = 291 \sqrt{K_H Z C_d} \quad (1)$$

式中: $K_H = a_{max}/g$, 是设计基本地震(加速度)系数; Z 为判别点深度(m); C_d 为与土层埋深和密实度

有关的所谓深度折减系数, 它是一个随深度增大而减小、其值小于 1 的经验统计值, 具体计算式见参考文献[1]、[2]。

将临界剪切波速作为液化判别标准, 对同一深度的 V_s 值与 V_{sl} 值进行比较, 若 $V_s < V_{sl}$ 则判定该点为地震液化土层, 否则为非地震液化土层。由此可见, 公式(1)的正确性和合理性直接影响着土层液化判别的可靠性。

为阐明计算公式(1)存在的问题, 我们简单介绍一下式(1)的理论推导过程及其前提条件。首先假定判别点 Z 深度范围内土层是均匀的, 设其重度为 γ (kN/m³)。自地表至判别点做一个单位截面积的直立土柱模型, 若地面存在最大水平地震加速度 a_{max} 值, 因土柱具有惯性质量 $\gamma Z/g$, 必将对土柱底端判别点处输入一最大地震水平剪应力 τ_{max} , 考虑

收稿日期: 2004-11-02

作者简介: 刘国辉(1952—), 男(汉族), 河北廊坊人, 教授, 主要从事勘查技术与工程专业教学与科研与教学工作。

到土柱不同深度的变形特征因素,引入深度折减系数 C_d 后有

$$\tau_{\max} = \gamma Z K_H C_d \quad (2)$$

由 Seed 简化法中的等效平均剪应力的概念,其有等效平均剪应力

$$\bar{\tau}_e = 0.65 \tau_{\max} \quad (3)$$

依据 Dobry 等人对饱和土震动液化剪切试验结论,从安全角度考虑,取饱和土出现超孔隙水压力的临界剪应变值为 1×10^{-4} ,其相应的剪切模量比为 0.75。将式(2)代入式(3),由虎克定律便得到式(1)。

由上述可知:目前用于饱和土地震液化判别中的临界剪切波速计算式,其应用前提条件与实际场况存在着较大偏差,主要集中在以下两个方面。

(1) 公式(1)是建立在地下土层均一条件下,即土层重度 γ 为常量,而实际多为层状分布的非单一土层。从而出现由式(1)计算出的临界剪切波速值与实际土层分布下的临界剪切波速存在着偏差。再者,该公式也没有考虑地下水位埋深的因素。

(2) 若被判别的土层属于拟建、或已建建筑物地基,由式(1)确定的临界剪切波速,仅适用于自由平坦场地饱和土震动液化判别,并没有考虑建筑物存在的场况条件,显然利用其计算值作为判别标准是不尽合理的。

针对上述存在的问题,我们提出了结合场况条件下的液化判别的改进方法,使其判别结论更好地反映实际场况条件,为抗震设计提供更可靠依据。

2 临界剪切波速计算改进式的推导

2.1 自由平坦地表、场地土呈水平层状分布下的 V_{st} 计算式

在自然场地条件下土层一般呈水平层状分布。为此,如图 1 所示,仍自地面到饱和土层内液化判别点做一个单位截面的直立土柱,设土柱内有 n 层土,其每层土的重度和厚度分别为: $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3 \dots \gamma_{n-1}, \gamma_n$ (地下水位以上取天然重度,地下水位以下取饱和重度 γ_{sat}) 和 $H_1, H_2, H_3 \dots H_{N-1}, H_N$, 并有: $Z = H_1 + H_2 + H_3 + \dots + H_{N-1} + H_N$ 。则式(2)应改为

$$\tau_{\max} = \sum_{i=1}^n \gamma_i H_i K_H C_d \quad (4)$$

同理,利用 Seed 简化法中的等效平均剪应力的概念和 Dobry 等人对饱和土震动液化剪切试验结论,判别 Z 处饱和土层的液化问题,则将临界剪切波速计算式(1)改为

$$V_{st} = 291 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \gamma_i H_i}{\gamma_n}} K_H C_d \quad (5)$$

显然,若在埋深 H 范围内土层均一,式(5)式则变为式(1)。

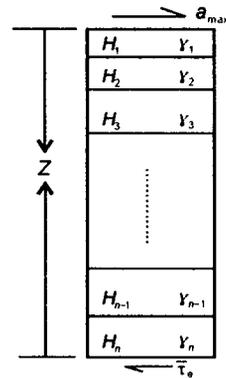


图 1 土柱模型

Fig. 1 Model of earth pillar.

2.2 拟建、或已建建筑物下水平层状地基土的 V_{st} 计算式

若场地内拟建、或存在已建建筑物,一方面,建筑物荷载的存在使地基内出现一附加应力 $\Delta\sigma_z$,饱和土层的有应力增加 $\Delta\sigma_z$ 。刘雪珠^[6]等人对饱和粉砂土等试样的共振柱试验结果证实,饱和土剪切模量随围压的增加而增大(图 2)。可以推断:建筑物的存在将提高建筑物基础下方及其周围邻域饱和土层的固结压力,使附加应力作用范围内土层的剪切模量得到不同程度的提高。在同样外剪应力作用下,其土层的剪应变减小,抗液化能力会得到增强,从而在地基内形成以基础底面为中心、与附加应力相对应的剪切模量增强域。对该域自身及其周边内饱和砂土液化势而言,均具有不同程度的抑制作

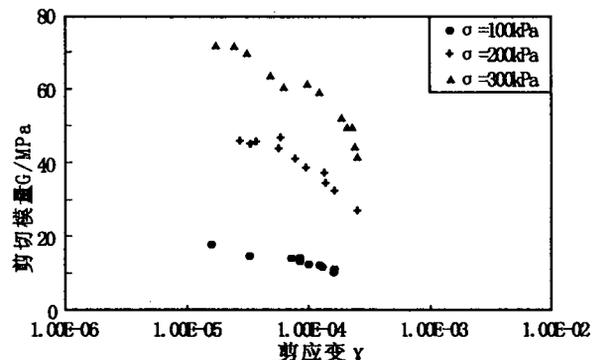


图 2 不同围压 σ 下饱和粉砂的动剪切模量 G 与剪切应变 γ 的关系(引自刘雪珠,2003)

Fig. 2 Relationship between shear modulus G and shear strain γ of saturation silty sand with different σ .

用,特别是对拟建建筑物场地进行饱和土层液化评价时,该因素是不应忽视的。鉴于地下附加压力以扩散方式的分布特征,即 $\Delta\sigma_z$ 随相距基础底面的距离增大而减小,我们将附加压力提高抗液化能力的效应近似折算为土柱附加高度

$$\Delta Z = (\Delta\sigma_z) / \gamma_n \quad (6)$$

并定义 $Z' = \Delta Z + Z$ 为液化判别点等效深度,将 Z' 代入 C_d 计算式计算出所谓的等效深度折减系数 C'_d ,用 C'_d 代替式(5)中的 C_d 。以使在饱和土层液化判别中加入拟建、或已建建筑物产生的附加应力有利提高抗液化能力的因素。

另一方面,建筑物载荷的存在相当于在土柱模型顶部附加惯性质量:

$$\Delta m = (F + G - D\gamma_D) / S \cdot g \quad (7)$$

式中: F 为上部建筑物重量(kg); G 为基础自身重量及其上回填土重量之和(kg); D 为基础底面埋深(m); γ_D 为地表至基础底面内地基土的等效天然重度(kN/m^3); S 为地基地面积(m^2)。因此,相对自由平坦地表场况条件下,使输入给饱和土层的地震作用又多一项建筑物地震惯性力产生的附加水平剪应力 $\Delta\tau_z$ 。鉴于地基内建筑物产生的附加应力与地震惯性水平剪应力间具有一定的相关性,则将二者用线性关系式近似描述,即

$$\Delta\tau_z = K_r \Delta\sigma_z \quad (8)$$

其中 K_r 为与基础、地基土层及其分布结构有关的统计意义下的待定系数。

若将 $\Delta\tau_z$ 折合为土柱模型内的等效附加重量 ΔW ,则 ΔW 与 $\Delta\sigma_z$ 同样具有线性相关关系,即

$$\Delta W = K_m \Delta\sigma_z \quad (9)$$

其中 K_m 为与式(8)相同意义下, ΔW 与 $\Delta\sigma_z$ 的相关待定系数。

基于以上因素式(4)将进一步改进为

$$\tau_{\max} = \left(\sum_{i=1}^n \gamma_i H_i + K_m \Delta\sigma_z \right) K_H C_d \quad (10)$$

从而,式(5)应进一步改进为

$$V_{sl} = 291 \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n \gamma_i H_i + K_m \Delta\sigma_z \right) \frac{K_H C_d}{\gamma_n}} \quad (11)$$

若场地内没有拟建、或已建建筑物存在,则式(11)将变为式(5)。

利用改进后的式(11)对场地进行饱和土层抗液化评价,除了与场地条件有关外,建筑物规模、基础分布及类型均在一定程度对其产生影响。建筑物的存在将改变自由平坦地表条件下的某些饱和土层抗液化性质。

3 应用实例

下面我们通过南水北调中线工程(河北段)渠道上 HCQD4 钻孔剪切波速测试结果,利用改进前后的临界剪切波速计算式,用于土层地震液化判别之中,并对其判别结果进行对比分析。

该场地拟建渠道建筑物基础为条形浅基础,宽度为 30 m,基底附加应力 100 kPa, K_m 经验统计值取 0.1, C'_d 值由 $C'_d = 1 - 0.013 3Z'$ 式确定。其地层岩性分布、实测 V_s 值和重度、计算 V_{sl} 值及判别结果如表 1 所示。

以上判别结果可知:利用目前所用公式(1)对近地表 $Z=3.0$ m 判别点,由于上覆盖层较薄,没有考虑上覆盖层重度较大或存在建筑物对输入地震力的影响,被判别非液化土层,而式(5)和式(11)考虑了以上的主要影响因素,相对输入了较大的地震作用力,则判别该点为液化土层,其结论是可由室内抗剪液化剪切试验验证的;对于深部 $Z=10.0$ m, 12.0 m 处,产生式(1)与式(5)和(11)判别的差异原因,主要是式(1)没有考虑上覆盖砂层重度比粉土层小使输入地震力减小,和建筑物存在使地基内竖向有效应力增大等因素,因为这些因素均可使土层的抗液化能力提高; $Z=14.0$ m 处,式(1)与式(5)判别结果的不同主要是由于该判别土层有较大重度的上覆盖层,对该点实际输入了较大的地震力所导致,式(1)与式(11)判别的一致性,主要是在式(5)场况基础上又考虑了建筑物存在的因素,其后者对该土层抗液化性影响比前者大,从而提高了土层的抗液化能力。

表 1 HCQD4 钻孔不同临界剪切波速计算式的饱和土层液化判别对比

序号	岩性	厚度 /m	测点深度 /m	重度 / $[\text{KN} \cdot \text{m}^{-3}]$	$V_s / [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$	公式(1)判别		公式(5)判别		公式(7)判别	
						$V_{sl} [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$	判别结果	$V_{sl} [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$	判别结果	$V_{sl} [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$	判别结果
1	粉土	0.5		19.4							
2	细砂	6.0	3.0	15.7	157	156	非液化	160	液化	166	液化
3	中砂	3.3	6.0	15.9	234	216	液化	219	液化	219	液化
4	粉土	3.2	8.0	19.6	252	246	液化	248	液化	243	液化
5	中砂	2.0	10.0	16.0	263	273	液化	243	非液化	242	非液化
			12.0		312	291	非液化	268	非液化	256	非液化
			14.0		312	310	非液化	316	液化	309	非液化

[参考文献]

- [1] Gabrielov A, Zaliapin I, Newman W I, et al. Colliding cascades model for earthquake prediction[J]. *Geophysical Journal International*, 2000, 143(2):427-437.
- [2] 尹京苑, 房宗菲, 钱家栋, 等. 红外遥感用于地震预测及其物理机理研究[J]. *中国地震*, 2000, 16(2):140-148.
- [3] 崔承禹, 支毅乔, 张晋开. 红外遥感用于地震预报的基础实验预研究[A]. 见: 第八届全国遥感技术学术交流论文集[C]. 1993. 103-105.
- [4] 耿乃光, 崔承禹, 邓明德. 岩石破裂实验中的遥感观测与遥感岩石力学的开端[J]. *地震学报*, 1992, 14(增刊):645-652.
- [5] 强祖基, 赁常恭, 等. 卫星热红外图象亮温异常——临震前兆[J]. *中国科学(D辑)*, 1998, 28(6):564-573.
- [6] 徐秀登, 徐向民. 地震前红外异常的基本特征与成因机制[J]. *西北地震学报*, 2001, 23(3):310-312.
- [7] 刘德富. 台湾集集强震前的卫星遥感长波辐射场变异分析[J]. *地球信息科学*, 2000, 2(1):33-36.
- [8] 覃志豪, ZHANG Ming-hua, Arnon Karnieli. 用 NOAA-AVHRR 热通道数据演算地表温度的劈窗算法[J]. *国土资源遥感*, 2001, 48(2):32-42.
- [9] 张元生, 郭晓, 张小美, 等. 应用静止卫星热红外遥感亮温资料反演地表温度的方法研究[J]. *西北地震学报*, 2004, 26(2):113-117.
- [10] 张元生, 柳钦火, 郭晓. 卫星热红外遥感在地震预报中的应用与研究进展[J]. *西北地震学报*, 2004, 26(4):357-361.

(上接 222 页)

4 结论

上述表明,在剪切波速判别饱和和土层液化的方法中,依据实际场况条件推导出的计算临界剪切波速的改进式(5)和式(11),使剪切波速判别饱和和土层液化的结论更加真实可靠,能为抗震设计提供更合理的依据。但这些仅是我们在用剪切波速判别饱和和土层液化方法合理性的探讨,还需要通过大量的实地调查和室内试验加以完善,特别是对修改后式(11)中的有相关系数的确定还需深入实际现场调查和统计研究。

[参考文献]

- [1] 水利水电工程地质勘察规范(GB50287-99)[S]. 北京:中国计划出版社,1999.
- [2] 祝龙根,刘利民,耿乃兴. 地基基础测试新技术[M]. 北京:机械工业出版社,1999. 92-93.
- [3] 陈希哲. 土力学地基基础[M]. 北京:清华大学出版社,1999. 52-66.
- [4] 谢定义. 土动力学[M]. 西安:西安交通大学出版社,1988. 94-108.
- [5] 石兆吉,郁寿松,丰万玲. 土壤液化的剪切波速判别法[J]. *岩土工程学报*, 1993, 15(1):74-80.
- [6] 刘雪珠. 南京及其邻近地区新近沉积土的动力特征和砂土震动液化试验研究[R]. 南京工业大学, 2003.
- [7] 建筑抗震设计规范(GB50011-2001)[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2001.
- [8] 建筑地基基础设计规范(GB50007-2002)[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2002.
- [9] 李国强,等. 建筑结构抗震设计[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2002.