

关于场地液化评价的几点认识

余跃心^{1,2}, 刘汉龙², 高玉峰²

(1. 淮阴工学院建筑工程系, 淮安 223001; 2. 河海大学岩土工程研究所, 南京 210098)

[摘要]较详细地分析说明了土层埋深、地下水位对临界标贯击数的影响, 澄清了规范公式所带来的上覆应力增加会使土层更易液化的误解。在对规范液化指数分析基础上, 重新定义了液化指数。新定义的修正液化指数概念具有明确的概率意义, 适用于场地液化评价和风险决策。

[关键词]场地 液化评价 液化指数

[中图分类号]TU44 **[文献标识码]**A **[文章编号]**0495-5331(2003)04-0085-05

1 问题的提出

在岩土工程勘察中, 对于饱和砂土或粉土地场的液化评价是一项非常重要的内容。标准贯入度试验(SPT)是规范推荐的液化评价试验方法, 该法是基于国内几次大地震震害现场实测资料并借鉴国外液化评价方法而建立起来的, 有丰富的第一手资料, 因而该法是现行抗震设计规范和岩土工程规范最主要的液化评价方法之一。由于液化机理的复杂性, 许多工程技术人员对规范判别公式的理解和应用感到困惑^[1,2]。文献[1,2]都指出:“当地下水位不变时, 标准贯入临界击数值随砂土所处深度的增加而增大, 即饱和砂土上部覆盖层厚度越大, 饱和砂土的液化可能性亦越大。这显然与实际不符。”由于土的形成过程完全是随机性的, 因此岩土的性质往往表现出很大的差异性。在建筑设计中, 上部结构和基础均按概率准则进行设计, 而场地液化评价等方面仍然采用确定性方法进行, 因而使整个建筑设计不能统一在一个准则下。

2 基于 SPT 的液化判别方法

在众多的液化判别方法中, 建筑抗震设计规范(GBJ5001-2001)^[3]所建议的 SPT 方法为工程技术人员所熟悉, 然而不少工程技术人员对于该法的液化判别公式仍然缺乏足够的理解。该法是通过标贯试验得到各土层标贯击数, 在初步评价的基础上对可液化土依据公式(1)计算出砂土层临界标贯击

数, 然后将实测标贯击数与临界标贯击数相比, 从而判断该土层是否液化。规范公式形式简洁, 便于应用。但是公式直观上会给技术人员带来误解, 即在地下水位不变情形下, 随着土层深度的增加, N_{cr} 也在增加。那么是否可以认为随着土层深度的增加, 也即上覆土压力的增加, 土层更容易液化呢? 这也是广大技术人员对液化判别感到困惑的问题。

现行建筑抗震设计规范所建议的临界标贯击数计算公式如下:

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

式中: N_{cr} 为临界标贯击数; N_0 为表 1 所给定的不同地震烈度下标贯击数; d_s 、 d_w 分别为砂土层的埋深和地下水位(m); ρ_c 为细粒含量。

表 1 标准贯入击数基准值

近远震	烈度		
	7	9	9
近震	6	10	12
远震	8	12	

液化判别方法分两步: 第一步确定 N_0 值, 第二步确定地下水位和砂的埋深影响函数 $F(d_s, d_w)$ 为直线形式 $[1 + a_w(d_w - 2) + a_s(d_s - 3)]$, 并给定 a_w 、 a_s 之数值。为了考虑地下水位和砂的埋深的影响, 应该对一系列具有不同地下水位和砂埋深的已知液化和未液化的地点, 进行现场勘察, 然后就不同的地下水位和砂的埋深, 确定相应条件下的临界值, 从而

[收稿日期]2002-04-01; **[修订日期]**2002-05-21; **[责任编辑]**李石梦。

[作者简介]余跃心(1964年-), 男, 1984年毕业于河海大学, 在职博士生, 讲师, 现主要从事土动力学和深基坑开挖支护方面的教学和研究工作。

给出包含烈度、标准贯入击数、地下水位和砂的埋深等因素的经验公式。但由于缺乏深层液化实例,因此采用 Seed 简化法以及 Gibbs 相对密度试验成果来确定(1)式中的系数。

2.1 不同土层埋深时临界值

直观来看,临界标贯值与土层埋深成正比,与地下水位成反比。对于给定地下水位,随着埋深的加大,临界值逐渐加大。表面来看,上覆土层愈厚,有效应力愈大,土层愈容易液化。显然,这是错误的。如何理解随着土层深度的增加, N_{cr} 也随之增加的这个现象? 下面将根据规范公式和 Seed 简化方法加以推导说明。

地震中任意一点发生的剪应力主要是由基岩向上传播的剪切波引起的。不同深度的地震剪应力与有效应力之比(临界应力比)用下式进行估算:

$$\frac{\tau}{\sigma'_v} = 0.65 \frac{a_{max}}{g} \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \gamma_d \quad (2)$$

式中: γ_d 为应力折减系数, $\gamma_d = 1 - 0.012d$; σ_v 、 σ'_v 分别为总应力和有效应力。

再根据剪应力比 τ/σ'_v 与地震级数,由图1确定临界修正标贯击数 N_1 ,再由下式计算不同上覆应力条件下的临界标贯击数:

$$N_{cr} = N_1 / C_N \quad (3)$$

$$C_N = 2.2 / (1.2 + \sigma'_v / P_a) \quad (4)$$

C_N 是为了考虑标贯击数随上覆有效应力增加而增加,因此应将不同埋深条件下标贯值修正同一上覆应力条件下(100 kPa)。

从而可以求出(1)式中的系数。从这个推导过程中可以看出,在工程勘察中所得到的标贯值是未

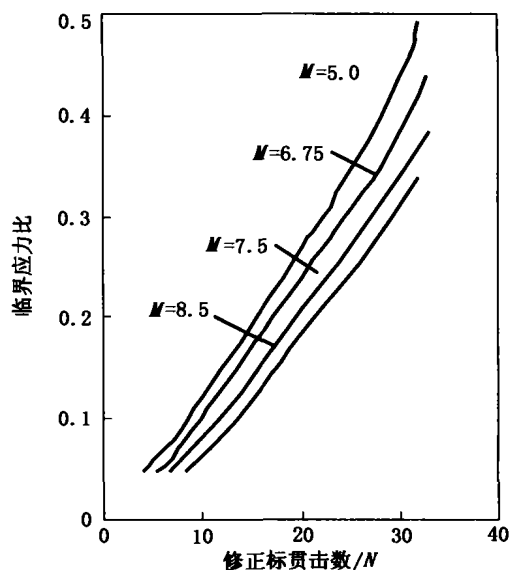


图1 修正标贯击数与临界应力比曲线

经上覆应力修正的,且不同深度和地下水位条件下临界应力比是不同的,是上覆总应力和有效应力比值的函数,也即与砂土层埋深和地下水位有关。图2为地下水位为2 m,不同埋深条件下由规范液化判别式(1)和 Seed 简化法计处的标贯值变化曲线(未经上覆应力修正)。我国在建立规范公式中,采用线性公式,但总体趋势同 Seed 简化法仍然一致。同时,也可以看出规范公式对于不同峰值加速度,当为 0.1 g 时,简化法偏保守。而为 0.2 g 时,我国判别法偏保守。图中曲线系按 NCEER^[8] 最新修正公式计算而来,与我国抗震设计规范条文说明中所给的图有所差异^[3]。

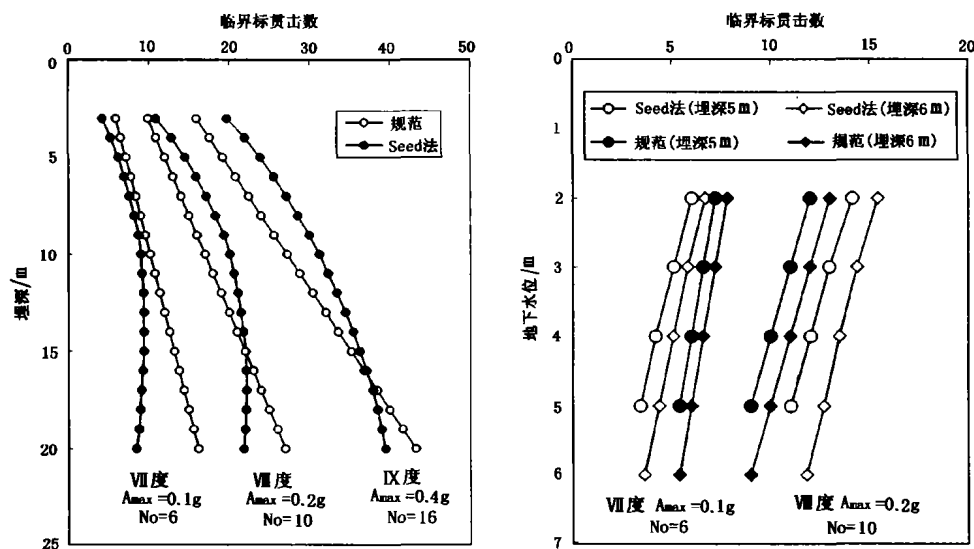


图2 地下水位、埋深对临界标贯击数影响曲线

如地下水位为 2 m,砂土层埋深为 3 m,按Ⅶ度设计,则该深度下临界应力比为 0.0752,临界标贯击数为 5.42,经上覆应力修正可得标贯击数为 4.19 击。若埋深为 6 m,临界应力比为 0.905,临界标贯击数为 7.30,经上覆应力修正可得标贯击数为 6.63 击。通过上述分析和说明,我们可以了解规范公式临界标贯击数随着深度增加而增加的原因是因为随深度增加剪应力比相应增加,标贯击数与上覆应力成正比。因此,当深度增加时,临界标贯击数表现增大的趋势。

2.2 地下水位对临界标贯击数影响

从公式 1 很容易看出,随着地下水位的降低,临界击数逐渐减小。这说明地下水位降低,使土层不易液化。与震害调查结果和室内研究一致。实际上从简化法公式中也很容易导出这个规律。从图 2 中可以看出,规范法和 Seed 法变化趋势一致。对于Ⅶ度,规范值要比 Seed 法结果大,偏保守;对于Ⅷ度,规范值比 Seed 法结果小,偏安全。

2.3 粉粒含量对临界标贯值的影响

随着粘粒含量的增加,土的抗液化强度也会增高,而标准贯入击数 N 值反而会降低。这便是粉土与砂土的不同之处。式(1)采用 $\sqrt{3/\rho_c}$ 这一项,来修正临界标贯击数,使公式具有明确的物理意义,因为 $\rho_c(\%) = 3$ 是砂性土与粉土的分界线。而美国则采用 $(N_1)_{60,cs} = \alpha + \beta(N_1)_{60}$ 来修正。其中 α, β 是与细粒含量有关的参数,与我国连续修正不同,参数是分段取值^[8]。图 3 为给定埋深为 5 m 和地下水位为 2 m 时,不同烈度的临界标贯击数随粘粒含量变化曲线图。从图中可以看出,随着粘粒含量的增加,规范

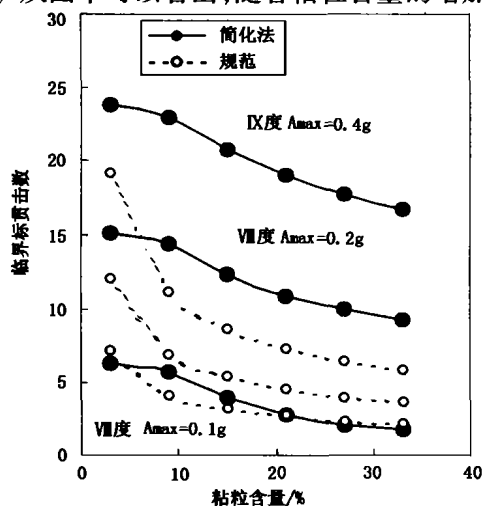


图3 临界标贯击数与粘粒含量关系曲线

与简化法的变化趋势相似,但规范判别式调节幅度大。对于Ⅷ度和Ⅸ度,由于 N_0 值较大,调节更为显著,而Ⅶ度时, N_0 较小,两者较为接近。经计算分析,这主要是由于规范液化判别式粘粒项是粘粒含量倒数的平方根而修正引起的。相对来讲,简化法粘粒修正系数 α, β 变化范围较小,调节作用不显著。

3 液化指数

建筑抗震设计规范(GB50011-2001),液化指数定义为下式:

$$L_{IE} = \sum_{i=1}^n \left(1 - \frac{N_i}{N_{cr}}\right) d_i \omega_i \quad (5)$$

式中: L_{IE} 为液化指数; N_i 和 N_{cr} 分别为 i 点标贯实测值和临界值; d_i, ω_i 分别为 i 点所代表的土层厚度和 i 土层单位土层厚度的层位影响权函数值。

该式中 $(1 - N_i/N_{cr})$ 项隐含了土层液化可能性与 N_i/N_{cr} 成线性反比关系。对于水平场地,规范预估液化危害的方法认为震陷是液化的主要危害。刘惠珊曾提出液化平均震陷量的经验方法,并认为标贯击数是影响震陷量的主要因素。从该法经验公式可知,震陷量与标贯击数呈非线性关系。若标贯值与临界值相等,即安全系数 F_s 等于 1, 则 $(1 - N_i/N_{cr})$ 等于 0, 实际上表示该土层不液化。反之,若标贯值很低,该项接近 1, 即表示该土层几乎肯定液化。若标贯值超过临界标贯值,该土层不液化。规范公式形式简洁,一定程度上反映了液化可能性的大小,但是不具备明确的概率意义。且当安全系数接近 1 时,也即标贯击数与临界标贯击数相差较小时,土层动力液化性质发生突变。从理论上讲,安全系数等于 1 表示液化可能性为 50% (这当然与安全系数计算方法有关)。场地震害调查表明土层是否液化,受地震震级、地下水位、土的密度、细粒含量等因素影响,安全系数大于 1 的场地液化在新泻、Loma 地震以及中国海城、唐山地震中都有发生^[6]。

如相距不远的两个场地地质条件、勘探距离和测点等都相同。假定地下水位为 2 m,埋深为 3 m 的砂土层。其中一个场地该层平均标贯击数为 5.9 击,按规范公式进行计算,临界标贯击数为 6 击,则该层土液化。而另一个场地的平均标贯击数为 6.1 击,则不液化。这清楚地说明了规范公式在处理这一类情况时,显得无能为力。显然有必要对液化指数进行重新定义,赋予其概率含义。笔者在另文中^[9]给出了具有概率意义液化指数公式:

$$L_{IE} = \sum_{i=1}^n P_{L,i} d_i \omega_i$$

用某土层的液化概率 $P(L)$ 来代替 $(1 - N_i/N_{ci})$, 使液化指数具有概率意义。液化概率为安全系数 N_i/N_{ci} 的函数, 它是非线性的。修正的液化指数避免了规范公式因土的变异性所带来的误判, 同时也使场地液化评价与上部结构设计统一在一个水准上。

表 2 具有概率意义的液化指数

F_s/P_L	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.4	1.6
液化层厚度/ m	1	0.997	0.962	0.854	0.675	0.482	0.325	0.217	0.146
15	100	99.674	96.180	85.399	67.493	48.183	32.540	21.687	14.620
13	90	89.706	86.562	76.859	60.744	43.364	29.286	19.518	13.158
11	80	79.739	76.944	68.319	53.995	38.546	26.032	17.349	11.696
9	70	69.771	67.326	59.779	47.245	33.728	22.778	15.181	10.234
7	60	59.804	57.708	51.239	40.496	28.910	19.524	13.012	8.772
5	50	49.837	48.090	42.699	33.747	24.091	16.270	10.843	7.310
3	30	29.902	28.854	25.620	20.248	14.455	9.762	6.506	4.386
1	10	9.967	9.618	8.540	6.749	4.818	3.254	2.169	1.462

注: F_s 为安全系数; P_L 为液化概率, 表 3 同表 2。

表 3 规范规定的液化指数

F_s	0	0.2	0.4	0.5	0.6	0.8	1
液化层厚度/ m	0	0.2	0.4	0.5	0.6	0.8	1
15	100	80	60	50	40	20	0
13	90	72	54	45	36	18	0
11	80	64	48	40	32	16	0
9	70	56	42	35	28	14	0
7	60	48	36	30	24	12	0
5	50	40	30	25	20	10	0
3	30	24	18	15	12	6	0
1	10	8	6	5	4	2	0

依修正液化指数对照规范分级方法, 也可以分成三个等级, 表 2、3 中分别用不同灰度表示。即液化等级为严重时, 修正液化指数大于 50; 液化等级为中等时, 修正液化指数介于 50~20 之间; 液化等级为轻微时, 修正液化指数小于等于 20。从表 2、3 中可以看出, 与规范分类相比, 按修正液化指数进行液化等级分类的三个区域有不同程度变化。当安全系数等于 1 时, 按规范规定应分为轻微, 而按修正液化指数有很大部分分成中等。这是因为安全系数等于 1 时, 液化概率约等于 50%, 而 $1 - N_i/N_{ci}$ 项为零。若液化层厚度为 1 m, 安全系数等于 0.4 时, 即 $1 - N_i/N_{ci}$ 项为 0.6, 规范液化指数为 6, 应为中等液化; 液化概率为 0.962, 修正液化指数仅为 9.618, 为轻微液化。这二种情况, 我们可以这样理解: 对于地表下 15 m 深都是可液化土层时, 若其安全系数接近 1 或稍大于 1, 规范认为是不液化的, 所以液化指

假定某场地地下水位为零, 可液化土层厚度由地表下 15 m 变化至 1 m, 液化土层安全系数则从 0 变化到 1.6。场地液化指数计算中按偏不利条件进行考虑, 即各层土的安全系数都取同样的值, 可液化土层都从地表开始, ω_i 根据相应的深度的取值。表 2、3 为按规范和本文指数公式所计算的液化指数。

数为零。标贯值实际上是一个随机变量, 当其接近标贯临界值时, 实际标贯值大于或小于临界值的概率是一样的, 即都为 50% (假定正态分布)。显然, 从概率意义上来讲, 这种情形下液化危害理应比液化土层厚为 1 m, 安全系数为 0.4 时的液化危害要大。

4 结 论

本文就 GBJ50011-2001 液化判别公式进行了讨论, 澄清了关于临界标贯击数随埋深而增加而引起的上覆应力愈大土层愈易液化的误解, 并通过计算得到了规范公式土的埋深这一项与 Seed 法简化法之间的差异。Ⅶ度时 $N_0=6$ 情形, Seed 法偏保守, $N_0=10, 16$ 情形, 规范公式偏保守。地下水位这一项规范公式偏保守。规范的液化指数定义从本质上来讲隐含了液化可能性对指数的影响, 但不具备概率意义。笔者提出的具有概率意义的液化指数定义一定程度上使指数能反映勘察深度内土层液化的可能性及危害严重性, 同时也使场地液化评价与上部结构统一在一个水准上。

[参考文献]

- [1] 刘金韬, 金晓娟. 饱和砂土液化判别方法中问题浅析[J]. 工程地质学报, 2000, 8(3): 379~384.
- [2] 赵伟, 张晓伟. 关于地震液化判别公式的探讨[J]. 公路, 2001, 9, 91.
- [3] GBJ50011-2001. 《建筑抗震设计规范条文说明》[S]. 北京: 中国建筑出版社.
- [4] 刘颖, 谢君斐. 砂土震动液化[M]. 北京: 地震出版社,

- 1984, 106~135.
- [5] 吴世明,周健,杨挺. 环境与岩土工程[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 39~45.
- [6] 周锡元,王广军,苏经宇. 场地地基设计地震[M]. 北京:地震出版社, 38~49.
- [7] I B 希德, I M 伊德里斯. 地震中的地面运动和土的液化[M]. 北京:地震出版社, 49~57.
- [8] T L Youd, I M Idriss. Liquefaction resistance of soils; summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils[J]. J Geotech, Geoenviron, Engreg, ASCE, 127(4):297~313.
- [9] 余跃心,刘汉龙,高玉峰. 场地液化势评价概率模型[J]. 工程勘察, 2002, 34(5).

CONSIDERATIONS ON EVALUATION OF SITES LIQUEFACTION

SHE Yue - xin^{1,2}, LIU Han - long², GAO Yu - feng²

(1. Huaiyin Institute of Technique, Huaian 223001;

2. Institute of Geotechnical Engineering, Hehai University, Nanjing 210098)

Abstract: The impact of solum depth and ground water level on critical standard penetration hammer is analyzed in detail, and misapprehensions about that large overburdened effective stress can make sands to liquefy easier are carried. New liquefaction index is presented on the basis of analyzing the liquefaction index of GBJ50011-2001. New liquefaction index has means of obvious probability, and can be applied to the evaluation of site liquefaction and risk decisions.

Key words: site, liquefaction evaluation, liquefaction index

上海安德仪器设备有限公司 企业介绍

上海安德仪器设备有限公司是原上海地质仪器厂的转制单位,公司云集了原上海地质仪器厂的主要技术、生产骨干,并聘请了一部分有专长的工程技术人员。所生产的地质仪器、公路仪器、实验室仪器等,均严格按照国家、行业及企业有关标准生产。产品质量可靠,用户遍及全国各地,深受广大用户的欢迎。

公司注重信誉,信守合同,全部产品实行“三包”,售后服务热情、及时,是广大用户可信赖的合作伙伴。本公司是上海市计量协会仪表电子专业委员会会员单位,并被评为上海市地区先进企业。公司以更高的要求,团结一致、踏实工作,不断地向用户提供高品位、高质量的产品。

敬请各新老用户来电、来函、来人联系,您定会得到诚挚而愉快地合作。

上海安德仪器设备有限公司可供地质仪器目录(部分)

序	产品名称	单位	产品型号	主要特性	价格(元)
1	井斜仪	台	JJX-3	顶角测量0°~50°测量误差不大于±30'井下仪器直径φ65mm	10708.00元
2	轻便测斜仪	台	KXP-1	顶角测量0°~50°测量误差不大于±30'井下仪器直径φ40mm	10632.00元
3	高精度测斜仪	台	KXP-1G	顶角精度≤±0.1°,0.5°可测方位。仪器外径,视用户需要	30000.00元
4	高精度测斜仪(数显)	台	JJX-3S	方位测量范围0°~36°精度≤±4'顶角0°~15°精度6'	35000.00元
5	小口径罗盘测斜仪	台	KXP-2	顶角分度值为2°测程0°~50°方位分度值为4°,仪器外径φ40mm	8400.00元
6	罗盘测斜仪	台	JXY-2	顶角,方位刻度分度值为2°,仪器直径为φ75mm	9000.00元
7	测斜仪校正台	台	JIG-2	是检定测斜仪器的顶角与方位的校验仪器,夹持仪器为φ62~76mm	11000.00元
8	倾角方位现场刻度器(便携式)	台	JJK-1	测量范围顶角0°~360°,精度±2°	3000.00元

地址:上海市普陀区西沙浜路40号 邮编:200063

电话:021-62448958(含传真) 021-32130202 业务联系人:柴成友、郑洪明