

DOI: 10.16285/j.rsm.2018.0985

# 液化判别临界曲线的变化模式与一般规律

李兆焱, 袁晓铭, 孙 锐

(中国地震局工程力学研究所 中国地震局地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

**摘 要:** 液化临界值与砂层深度的关系是液化判别方法的基本表征, 但对比分析表明, 现有液化判别方法的临界曲线有不同的表现模式, 甚至定性相反。以 Seed-Idriss 模型为基础, 推导出了砂层埋深对液化势影响的理论解答, 提出了砂层埋深与液化临界值的普遍关系, 得到了液化判别临界曲线的变化模式和一般规律。结果表明: 一般而言, 随砂层深度增加, 水平地震剪应力和土体抗液化强度同时增大, 但前者增大速率大于后者, 液化势及液化临界值与砂层深度呈正相关关系; 液化临界值与砂层深度呈非线性递增关系, 浅埋处饱和砂层液化势递增较为剧烈, 深埋处趋于平缓; 我国规范 CPT 液化判别公式的液化临界值与砂层深度呈递减关系, 存在定性错误, 需要纠正; 现有一些液化判别公式中, 液化临界值与砂层深度呈线性递增关系, 定性正确但模型需要改进。所得结果可为液化判别方法正确发展提供理论基础和借鉴。

**关 键 词:** 液化判别曲线; 砂层深度; 液化判别公式; 静力触探测试; 标准贯入测试

中图分类号: TU470

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2019)09-3603-08

## Variation tendencies and general rules for critical curve of liquefaction evaluation

LI Zhao-yan, YUAN Xiao-ming, SUN Rui

(1 Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration of China Earthquake Administration, Institution of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin, Heilongjiang 150080, China)

**Abstract:** The liquefaction evaluation methods are basically characterized by the relationship between the critical liquefaction curve and the depth of the soil layer. However, the comparative analysis shows that the critical curves of the existing liquefaction evaluation methods have different performance modes and even qualitative opposite. In this paper, based on the Seed-Idriss model, the theoretical solution of the effect of soil depth on the liquefaction potential was derived, and the general relationship between the depth of the soil layer and the critical liquefaction value was put forward. Meanwhile, the variation trend and general rules for liquefaction critical curves were obtained. The results show that with the increase of soil depth, the increasing rate of horizontal shear stress is faster than that of liquefaction resistance of soil layer. Moreover, the liquefaction potential and critical liquefaction value have positive correlations with the depth of the soil layer. The critical value increases nonlinearly with the soil depth, which means that the liquefaction potential increases drastically in the shallow layer, but gently in the deep layer. In the CPT liquefaction evaluation of the national standards in China, it is reported that the critical liquefaction value has a decreasing relationship with the soil depth, which is qualitative error and needs to be corrected. In some existing liquefaction discriminant formulas, the critical value increases linearly with the depth of sand layer, which is qualitatively correct, but the model needs to be improved. The results of this paper can provide a theoretical basis and reference for the development of liquefaction evaluation methods and the future revision of national and professional standards.

**Keywords:** critical liquefaction curve; soil layer depth; liquefaction evaluation; cone penetrate test; standard penetrate test

## 1 引 言

震害预防在注重灾后救助向注重灾前预防转变

的防灾、减灾、救灾新理念中地位重要。工程场地地震效应在震害预防中地位尤为重要, 其核心任务是对场地进行液化判别<sup>[1-3]</sup>。液化判别方法制约着工

收稿日期: 2018-06-06

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目 (No.51508532); 国家重点研发计划政府间国际科技创新合作重点专项 (No.2016YFE0105500)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China(51508532) and the Key Research and Development Plan 'Inter Governmental Cooperation in International Scientific and Technological Innovation' Key Projects(2016YFE0105500).

第一作者简介: 李兆焱, 男, 1982 年生, 博士, 副研究员, 主要从事岩土地震工程、土动力学研究。E-mail: hkjlizhaoyan@163.com

通讯作者: 袁晓铭, 男, 1963 年生, 博士, 研究员, 主要从事岩土地震工程、土动力学研究。E-mail: yxmiem@163.com

程造价的合理性和震害防御的可靠性, 历来受到国内外专家、学者的高度重视<sup>[4-7]</sup>, 是岩土工程学的重要研究领域<sup>[8-9]</sup>。

液化判别方法主要分为两大类<sup>[10]</sup>, 一是进行室内土动力学试验, 但由于在取样过程中, 取样方法不可避免地会对土样造成扰动, 室内试验方法可靠性受到较大质疑; 二是直接进行现场原位试验, 对场地中砂层抗液化性能作出评估, 这是目前评估场地是否液化的主要方法。在我国, 液化判别公式基本是以砂层埋藏条件(地下水位和砂层埋深)、表征砂层抗液化能力的实测指标(砂层标准贯入试验(SPT)、静力触探试验(CPT)和剪切波速  $V_s$  试验)以及场地遭遇的地震强度(烈度)等三方面参数构成, 已经被工程技术人员广泛接受, 形成了具有中国特色的液化判别方法<sup>[11]</sup>。

## 2 研究背景

2003 年 2 月 24 日, 新疆巴楚—伽师地区发生 6.8 级强烈地震(以下简称“巴楚地震”), 造成大量人员伤亡和财产损失, 大规模砂土液化是本次地震的一个重要特点, 液化范围相当于 1975 年海城地震, 此次地震为检验我国规范场地地震效应评价方法和完善液化判别方法提供了难得的机遇<sup>[12]</sup>。李兆焱等<sup>[13]</sup>对巴楚地震液化场地进行了全面系统测试, 获取了 40 余个同时含有 SPT 和 CPT 数据的场地实测资料, 给出了以地下水位、砂层埋深、SPT 和 CPT 及地震烈度为参数液化判别公式, 将这些公式与我国几个抗震规范中现有液化判别公式进行了对比, 并特别比较了地下水位一定的条件下液化判别临界值随砂层埋深的变化关系。结果表明, 所有公式中液化临界值随砂层埋深增加均呈现增长, 只有我国《岩土工程勘察规范》(GB50021-2001)(简称“岩规”)<sup>[14]</sup>中 CPT 液化判别公式随砂层埋深增加呈现减小趋势。SPT 和 CPT 均是表征砂层抗液化能力的指标, 二者液化临界值随砂层埋深变化定性上均应呈现相同的规律。因此, 上述显著差异的现象需要研究, 否则会对工程造价和工程安全产生严重影响。

按土力学现有认识, 地下水位一定时随砂层埋深增加, 其承受的有效应力和总应力均增加, 土体抗液化能力将增强; 同时随埋深增加土层承受的水平地震剪应力也会增加, 土体受到的地震应力也将增强。在二者联合作用下土体是增强还是减弱或不变目前不清晰, 即更一般性的问题是, 砂层埋深对砂层液化势影响一般规律如何, 给出这一问题的答

案, 对认识砂层埋藏条件对液化的影响以及判定现有液化判别公式的实用性和可靠性都有很大帮助。

以巴楚地震液化调查及与现有液化判别公式对比为背景, 展现不同公式砂层埋深与液化判别临界值的基本关系, 以 Seed-Idriss 模型为基础, 推导砂层埋深对液化势影响的计算公式, 剖析液化判别临界值随深度的变化模式与一般规律, 为液化判别方法正确发展提供理论基础和指导。

## 3 现有液化判别公式的对比

巴楚地震中砂土液化现象严重, 是继 1976 年唐山地震后近 30 多年来中国大陆出现砂土液化现象最显著的一次地震。

地震后, 对巴楚地震液化场地进行了全面系统测试。此次考察的特点是对 40 个地震液化场地同时进行 SPT 和 CPT 原位测试, 这在以往砂土液化现场调查中尚无先例。

### 3.1 新疆巴楚地区液化判别公式

根据调查资料给出了新疆地区基于 SPT 和 CPT 的液化判别公式<sup>[8]</sup>(简称“新疆 SPT 公式”和“新疆 CPT 公式”):

$$N_{cr} = N_0[0.8 - 0.02d_w + 0.08d_s] \quad (1)$$

$$q_{cr} = q_0[0.9 - 0.1d_w + 0.1d_s] \quad (2)$$

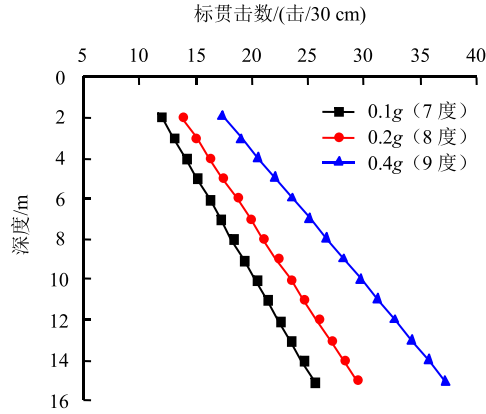
式中:  $d_w$  为地下水位深度(m);  $d_s$  为饱和砂层埋深(m);  $N_{cr}$ 、 $q_{cr}$  分别为液化判别标贯和锥尖阻力临界值;  $N_0$ 、 $q_0$  分别为标贯和锥尖阻力的基准值; 在地震烈度为 7 度、8 度和 9 度下  $N_0$  分别为 13、15、19 击,  $q_0$  分别为 4.8、5.8、7.4 MPa。式(1)、(2)均为线性模式, 与我国建筑抗震设计规范早期的公式相同。

需要注意的是, 对于式(1)、(2), 表征砂层埋深影响项  $d_s$  前面的系数分别为 0.08 和 0.10, 数值大小不同但均为正数。这表明, 式(1)、(2)虽然表示的是由 SPT 和 CPT 的这两种参数构造而成的液化判别公式, 但在反映砂层埋深对液化可能性的影响趋势上是一致的。以  $d_w$  取 2 m 为例,  $N_{cr}$ 、 $q_{cr}$  随砂层埋深的变化如图 1 所示, 表明液化判别标准贯入锤击数临界值和锥尖阻力临界值均随砂层埋深增加而增加。

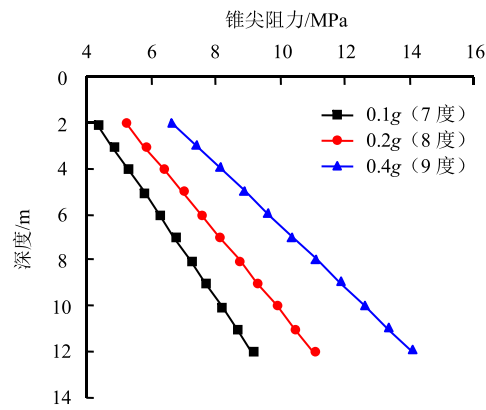
### 3.2 现有公式的对比

以地下水位、砂层埋深、SPT 或 CPT 等土层常规指标为直接变量构造的液化临界值计算公式, 是中国几个主要抗震规范中液化判别公式的基本形

式, 出现在《岩土工程勘察规范》(GB50021—2001) (简称“岩规”)[14]、《建筑抗震设计规范》(GB50011—2010) (简称“建规”)[15]和《铁路工程抗震设计规范》(GB50111—2006) (简称“铁规”)[16]中。



(a) 标准贯入测试



(b) 静力触探测试

图1 新疆液化判别公式临界值

Fig.1 Critical liquefaction value in the Xinjiang liquefaction evaluation

建规中以 SPT 表达的液化判别公式[15]为

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

式中:  $\beta$  为与地震分组有关的调整系数, 在 0.80~1.05 间变化。以  $d_w$  取 2 m 为例,  $N_{cr}$  随砂层埋深的变化如图 2 所示。

铁规采用的也是 SPT 判别公式, 其表达式虽与建规不同, 但  $N_{cr}$  随砂层埋深的变化与图 2 基本相同。

岩规采用的是 CPT 表达的液化判别公式[14], 其表达为

$$q_{crr} = q_{co} \alpha_w \alpha_u \alpha_p \quad (4)$$

$$\alpha_w = 1 - 0.065(d_w - 2) \quad (5)$$

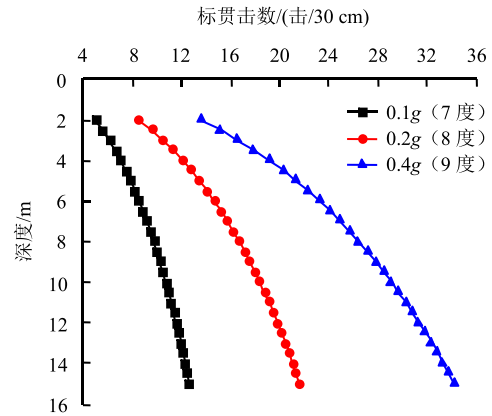


图2 规范标准贯入测试液化临界值

Fig.2 Critical liquefaction value in the standards of SPT

$$\alpha_u = 1 - 0.05(d_u - 2) \quad (6)$$

式中:  $q_{crr}$  为岩归锥尖阻力临界值;  $q_{co}$  为锥尖阻力基准值;  $\alpha_p$  为与土性有关的修正系数, 砂土时取  $\alpha_p = 1$ ;  $\alpha_w$ 、 $\alpha_u$  分别为地下水位埋深修正系数和上覆非液化土层厚度修正系数;  $d_u$  为上覆非液化土层厚度。假设液化土层平均厚度为 3 m,  $\alpha_u = 1 - 0.05(d_s - 3.5)$ ;  $d_w$  取 2 m 为例, 临界锥尖阻力随砂层埋深的变化如图 3 所示。

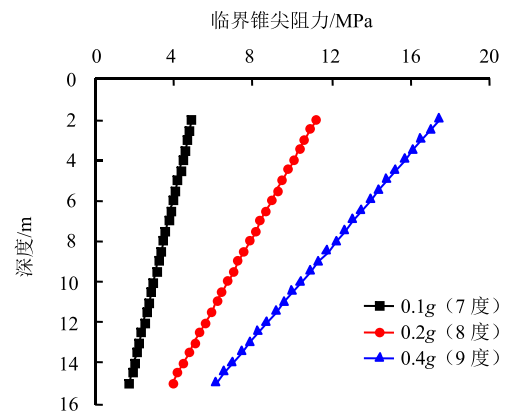


图3 规范 CPT 液化判别临界值

Fig.3 Critical liquefaction value in the standards of CPT

需注意的是, 式 (3) 砂层埋深影响项  $d_s$  的系数为正数, 与式 (1)、(2) 定性相同; 式 (6) 砂层埋深影响项的系数为负数, 与式 (1)~(3) 均定性相反。这意味着, 建规和新疆公式中液化判别标贯或锥尖阻力临界值随砂层埋深增加 (如图 1、2) 所示, 而岩规锥尖阻力临界值随砂层埋深增加反而减小 (如图 3 所示)。同时, 也要注意, 新疆液化判别公式中临界值随土层深度呈现线性变化, 这与我国建规 SPT 液化判别方法的早期模式相同, 而现

在建规 SPT 液化判别方法临界值随土层深度的呈现非线性变化, 模式有所不同。

这两个问题的本质是液化势随土层埋深和地下水位的变化规律问题。一般来说, 对于给定的地下水位, 砂层埋深越深, 其承受的有效应力和总应力均增加, 此时土体抗液化能力将增强; 但同时随埋深增加, 土层承受的水平地震剪应力也会增加, 土体受到的地震应力也将增强。液化势随土层埋深的变化性态是二者联合作用的结果。随砂层埋深的增加砂层液化势的增减及基本形态, 也即液化临界值随深度变化模式和规律, 则成为在理论上需要研究解决的问题。

## 4 埋深对液化势影响的理论解答

### 4.1 Seed-Idriss 模型

预测土层液化势的 Seed-Idriss 模型<sup>[17-18]</sup>已经得到国内外广泛认可, 本文以此为基础, 导出地下水位和土层深度对液化势影响的理论解答。

以 Seed-Idriss 模型为基础, 则土层水平最大剪应力幅值  $\tau_m$  为

$$\tau_m = \gamma_d \frac{a_{\max}}{g} \sigma_\gamma = \gamma_d \frac{a_{\max}}{g} \sum_{i=1}^n \gamma_i h_i \quad (7)$$

式中:  $\gamma_d$  为应力折减系数;  $\gamma_i$  为各层土的重度;  $h_i$  为各土层厚;  $a_{\max}$  为地表峰值加速度;  $g$  为重力加速度;  $\sigma_\gamma$  为土层上覆总应力。

等价的水平地震剪应力的最大幅值  $\tau_{eq}$  为

$$\tau_{eq} = 0.65 \tau_m = 0.65 \gamma_d \frac{a_{\max}}{g} \sigma_\gamma = 0.65 \gamma_d \frac{a_{\max}}{g} \sum_{i=1}^n \gamma_i h_i \quad (8)$$

按 Seed-Idriss 模型, 饱和砂土体能够发生液化的最小水平地震剪应力  $\tau_d$  为

$$\tau_d = C_\gamma \frac{\sigma_{a,d}}{2\sigma_3} \sigma'_\gamma \quad (9)$$

式中:  $\sigma_{a,d}$  为动应力;  $\sigma_3$  为动三轴试验  $45^\circ$  面上的有效法向应力;  $C_\gamma$  为与砂土相对密度相关的修正系数。  $\sigma'_\gamma$  为作用于土体的竖向有效应力, 其表达为

$$\sigma'_\gamma = \sum_{i=1}^n \gamma'_i h_i \quad (10)$$

式中: 处于水位上,  $\gamma'_i$  为土的天然重度; 处于水位下,  $\gamma'_i$  为土的有效重度, 表示为  $\gamma'_i = \gamma_{sat} - \gamma_w$ ;  $\gamma_w$  为水的重度;  $\gamma_{sat}$  为饱和砂土重度。

进一步, 在不同相对密度下液化应力比表达为

$$\frac{\sigma_{a,d}}{2\sigma_3} = \frac{D_r}{50} \left[ \frac{\sigma_{a,d}}{2\sigma_3} \right]_{50} \quad (11)$$

式中:  $\left[ \frac{\sigma_{a,d}}{2\sigma_3} \right]_{50}$  为 50% 相对密度下的液化应力比。由式 (9) 和式 (11), 可以将饱和砂土液化所需要的水平地震剪应力  $\tau_d$  为

$$\tau_d = C_\gamma \frac{D_r}{50} \left[ \frac{\sigma_{a,d}}{2\sigma_3} \right]_{50} \sigma'_\gamma \quad (12)$$

按 Seed-Idriss 模型, 当  $\tau_{eq} > \tau_d$  时, 也就是当饱和砂土体承受的水平地震剪应力大于饱和砂土体能够发生液化所需要的最小水平地震剪应力时, 判断该土层为液化区域, 反之判断该土层为非液化区域。

### 4.2 砂层埋深与液化势关系的理论解答

Seed-Idriss 模型中, 临界状态可以表示为  $\tau_{eq} / \tau_d = 1$ , 本文则进一步将液化势以  $\tau_{eq} / \tau_d$  表示, 即

$$f = \tau_{eq} / \tau_d \quad (13)$$

则  $f$  越大, 液化势越大, 土体液化可能性越大, 反之同理。

本文以如图 4 所示的半空间均质土层概化模型为研究对象, 理论推导砂层埋深与液化势关系<sup>[19-20]</sup>。图 4 中,  $h_w$  为下水位埋深,  $h_s$  为砂层埋深。  $\gamma$  为土的重度。

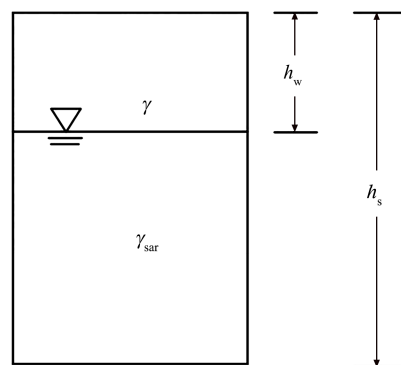


图 4 弹性半空间均质土层概化模型

Fig.4 Generalized model of homogeneous soil layer in elastic semi-space

图 4 中,  $h_s$  处的  $\sigma_\gamma$  可表示为

$$\sigma_\gamma = \gamma h_w + \gamma_{sat} (h_s - h_w) = (\gamma - \gamma_{sat}) h_w + \gamma_{sat} h_s \quad (14)$$

$h_s$  处的  $\sigma'_\gamma$  可表示为

$$\sigma'_\gamma = \gamma h_w + \gamma' (h_s - h_w) = (\gamma - \gamma') h_w + \gamma' h_s \quad (15)$$

由式 (8) 和式 (12), 有

$$f = \frac{\tau_{eq}}{\tau_d} = \frac{0.65\gamma_d \frac{a_{max}}{g}}{C_\gamma \frac{D_r}{50} \left[ \frac{\sigma_{a,d}}{2\sigma_3} \right]_{50}} \frac{\sigma_\gamma}{\sigma'_\gamma} = \frac{0.65\gamma_d \frac{a_{max}}{g} \sum_{i=1}^n \gamma_i h_i}{C_\gamma \frac{D_r}{50} \left[ \frac{\sigma_{a,d}}{2\sigma_3} \right]_{50} \sum_{i=1}^n \gamma'_i h_i} \quad (16)$$

设  $\frac{0.65\gamma_d \frac{a_{max}}{g}}{C_\gamma \frac{D_r}{50} \left[ \frac{\sigma_{a,d}}{2\sigma_3} \right]_{50}}$  为  $k$ , 则式 (16) 可写为

$$f = \frac{\tau_{eq}}{\tau_d} = k \frac{\sigma_\gamma}{\sigma'_\gamma} = k \frac{\sum_{i=1}^n \gamma_i h_i}{\sum_{i=1}^n \gamma'_i h_i} \quad (17)$$

对于图 4 的半空间土层简化模型, 假定其匀质, 即沿深度方向均为单一质土体、具有相同密实程度的砂层 (简化模型目的在于使土的天然重度、有效重度一致, 方便数学模型计算, 实际工程场地中土的天然重度、有效重度变化随密实程度变化不是很大), 而对于埋深 12 m 以内的土体, 应力折减系数  $\gamma_d$  在 1.0~0.85 之间<sup>[21]</sup>, 则  $k$  值可近似认为是常数。这样, 液化势可简化为以  $h_s$  为变量的函数  $f(h_s)$ , 表达可简化为

$$f(h_s) = \frac{\tau_{eq}}{\tau_d} = k \frac{\gamma h_w + \gamma_{sat}(h_s - h_w)}{\gamma h_w + \gamma'(h_s - h_w)} = k \frac{(\gamma - \gamma_{sat})h_w + \gamma_{sat}h_s}{(\gamma - \gamma')h_w + \gamma'h_s} \quad (18)$$

对砂土层埋深求导, 则有

$$f'(h_s) = k \frac{\gamma_{sat}\gamma h_w - \gamma'\gamma h_w}{[(\gamma - \gamma')h_w + \gamma'h_s]^2} = k \frac{(\gamma_{sat} - \gamma')\gamma h_w}{[(\gamma - \gamma')h_w + \gamma'h_s]^2} \quad (19)$$

因为  $\gamma_{sat} - \gamma' > 0$ , 则由式 (19), 得  $f'(h_s) > 0$ , 即  $f(h_s)$  是单调递增函数, 这表示对任意定值的地下水位, 饱和砂层埋深变大, 则液化势变大。也就是说, 即液化临界值与饱和砂层埋深成正相关关系, 如果液化势是埋深一次函数的话, 砂层埋深前面的系数应为正值。文中提出的一些液化判别公式, 随我国规范 CPT 液化判别公式外, 均与之一致, 由此可见我国规范 CPT 液化判别公式, 存在定性错误, 需要纠正。

由式 (19) 可见, 液化势是埋深的单调递增函数, 一个场地中埋深较深处砂层液化势较大。由此可以推论, 随砂层埋深增加土体抗液化能力增强的速率小于砂层埋深增加后水平地震应力增加的速率, 二者联合作用下土体液化势最终将增大。

## 5 埋深对液化势增量的影响规律

引入高等数学中变化率的定义, 饱和砂层埋深引起液化势的变化率可写为

$$\delta(h_w, \Delta h_s) = \frac{\Delta f(h_w, \Delta h_s)}{f(h_w, h_s)} \quad (20)$$

$$\Delta f(h_w, \Delta h_s) = f(h_w, h_s + \Delta h_s) - f(h_w, h_s) \quad (21)$$

式中:  $\Delta h_w$  为地下水埋深增量;  $\Delta h_s$  为饱和砂层埋深变化量, 将式 (18) 代入式 (20)、(21), 则饱和砂层埋深变化下液化势的变化率可表达为

$$\delta(h_w, \Delta h_s) = \frac{2(h_s + \Delta h_s) - 0.2h_w}{(h_s + \Delta h_s) + 0.8h_w} \cdot \frac{h_s + 0.8h_w}{2h_s - 0.2h_w} - 1 \quad (22)$$

利用式 (22), 计算分析可得到砂层埋深对液化势影响的模式和规律。

首先就随机取两种不同地下水位且砂层埋深变化不同情况, 对其液化势增量进行对比分析。图 5 表示地下水位 2 m 时, 砂层埋深由 4 m 逐渐增大到 12 m 过程中液化势的变化率; 图 6 表示地下水位 6 m, 砂层埋深由 8 m 逐渐增大到 12 m 过程中液化势的变化率。由图可见, 液化势随砂层埋深增加而增加, 并呈现非线性模式, 且地下水位较浅时, 非线性特征尤为显著。

利用式 (22), 对于同一水位、砂层位于不同层

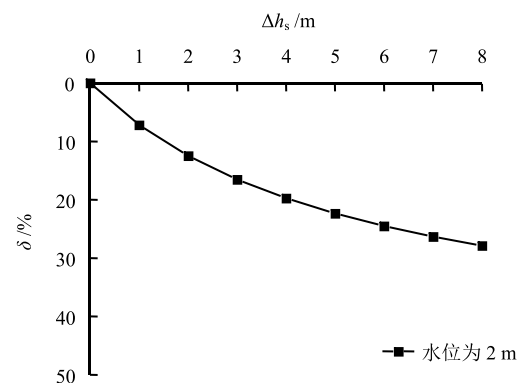


图 5 地下水位 2 m 时, 砂层埋深由 4 m 逐渐增大到 12 m 过程中液化势的变化率

Fig.5 Change rate of liquefaction potential by soil layer gradually increased from 4 m to 12 m (water level is 2 m)

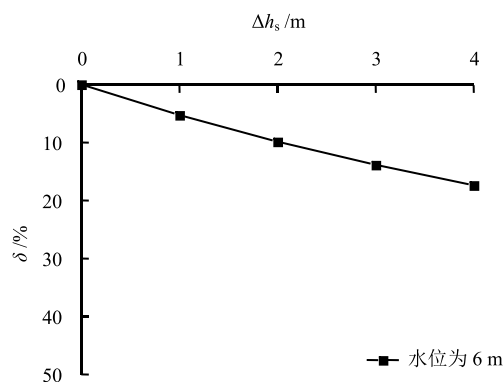


图6 地下水位 6 m 时, 砂层埋深由 8 m 增大到 12 m 过程中液化势的变化率

Fig.6 Change rate of liquefaction potential by soil layer gradually increased from 8 m to 12 m (water level is 6 m)

位但具有相同深度变化量下其液化势增量的比较如图 7 所示。表示了地下水位 2 m 时, 砂层埋深分别由 3 m 变到 7 m、4 m 变到 8 m、8 m 变到 12 m 情况下液化势的变化率。由图所示, 砂层液化势的变化程度受其砂层原层位的影响很大。原层位较深时, 砂层埋深增加导致砂层液化势的增加有限; 原层位较浅时, 同样的砂层埋深增量将导致砂层液化势显著增加。例如, 埋深 3 m 变到 7 m 与 4 m 变到 8 m 的埋深差别并不十分大, 但引起的液化势的增量却相差近 50%。

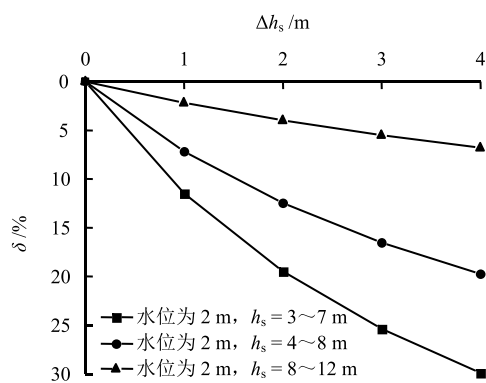


图7 地下水位 2 m 时, 砂层埋深 3~7 m、4~8 m 和 8~12 m 变化下对砂层液化势的影响

Fig.7 Effects of soil layer depth changing from 3 m to 7 m, 4 m to 8 m and 8 m to 12 m on liquefaction potential (water level of 2 m)

由图 6 和图 7 的结论看出, 现有液化判别公式液化临界值与砂层深度呈线性递增关系, 定性正确但模型需要改进。

利用式 (22), 对于水位不同但同一层位砂层且埋深具有相同变化量下的液化势增量比较绘于图 8, 表示了水位分别为 1、2、3 m 时, 砂层埋深统一由

4 m 变到 8 m 时液化势的变化率。由图 8 可见, 液化势随砂层埋深增加的程度受水位影响也很大。水位很浅 (小于 1 m) 时, 砂层埋深增加 4 m 将导致砂层液化势有一定的增加; 水位 2 m 时, 同样的砂层埋深增量导致的砂层液化势有较为显著的增加; 水位超过 3 m 时, 同样的砂层埋深增量导致的砂层液化势有显著的增加。但随水位增加, 引起的液化势增量的差别呈现减少趋势。

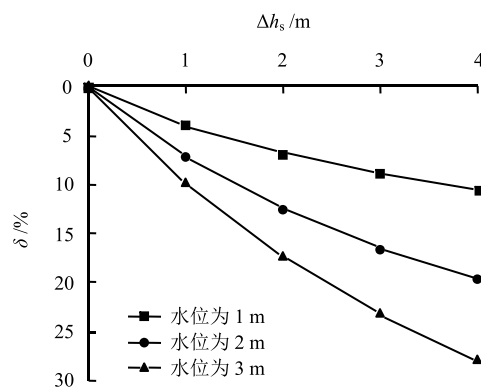


图8 不同地下水位 (1、2、3 m) 下砂层埋深由 4 m 变化到 8 m 时砂层液化势的变化率

Fig.8 Change rate of liquefaction potential by soil layer from 4 m to 8 m in the state of distinct water level

上述分析中, 液化势的增量特征和液化临界值与深度增量关系特征等同, 结果亦反映了液化临界值随深度变化的一般规律。

按以上分析结果, 建规公式、铁规公式、新疆 SPT 公式和新疆 CPT 公式定性正确, 但新疆 SPT 公式和新疆 CPT 公式与埋深为线性增长关系, 需要改进; 岩规 CPT 液化判别公式的临界值与砂层深度呈递减关系, 存在定性错误。

## 6 结 论

通过实际地震液化调查资料及现有不同方法的对比, 发现了我国规范 CPT 液化判别公式等出现的问题, 以 Seed-Idriss 模型为基础, 推导出了砂层埋深对液化势影响的理论解答, 得到了砂层埋深对液化势以及液化临界值影响的一般规律, 主要结论如下:

(1) 理论分析表明, 随砂层深度增加, 水平地震剪应力和土层抗液化能力同时增大, 但前者增大速率大于后者, 液化势及液化临界值与砂层深度呈正相关关系。

(2) 液化临界值与砂层深度呈非线性递增关系, 浅埋处饱和砂层液化势及液化临界值递增较为剧

烈, 深埋处趋于平缓; 同样深度范围内, 地下水位较深时饱和砂层液化势及液化临界值递增较为剧烈。

(3) 我国规范 CPT 液化判别公式的液化临界值与砂层深度呈递减关系, 存在定性错误, 需要纠正; 现有其他液化判别公式中, 液化临界值与砂层深度呈递增关系, 定性正确, 但部分为线性递增关系, 模型需要改进。

### 参考文献

- [1] 谢君斐. 关于修改抗震规范砂土液化判别公式的几点意见[J]. 地震工程与工程振动, 1984, 4(2): 95—126.  
XIE Jun-fei. Some comments on the formula for estimating the liquefaction of sand in revised a seismic design code[J]. **Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration**, 1984, 4(2): 95—126.
- [2] 袁晓铭, 曹振中. 基于土层常规参数的液化发生概率计算公式及其可靠性研究[J]. 土木工程学报, 2014, 47(40): 99—108.  
YUAN Xiao-ming, CAO Zhen-zhong. Conventional soils parameters-based liquefaction probabilistic evaluation formula and its reliability analysis[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2014, 47(40): 99—108.
- [3] YOUD T L, IDRIS I M, ANDRUS R D, et al. Liquefaction resistance of soils: summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2001, 127(4): 817—833.
- [4] IDRIS I M, BOULANGER R W. Soil liquefaction during earthquakes[M]. Davis: Earthquake Engineering Research Institute, 2008.
- [5] ROBERTSON P K, WRIDE C E. Cyclic liquefaction and its evaluation based on the SPT and CPT[R]. [S. l.]: National Center for Earthquake Engineering Research, 1996.
- [6] 付海清, 袁晓铭, 王淼. 基于现场液化试验的饱和砂土孔压增量计算模型[J]. 岩土力学, 2018, 39(5): 1611—1618.  
FU Hai-qing, YUAN Xiao-ming, WANG Miao. An incremental model of pore pressure for saturated sand based on in-situ liquefaction test[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(5): 1611—1618.
- [7] 刘汉龙, 王维国, 刘军, 等. 饱和砂土地大型爆炸液化现场试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(4): 601—608.
- LIU Han-long, WANG Wei-guo, LIU Jun, et al. Large-scale field tests on blast-induced liquefaction in saturated sand[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2017, 39(4): 601—608.
- [8] 李兆焱. 基于巴楚地震调查的液化判别方法的研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2012.  
LI Zhao-yan. A study of liquefaction discrimination methods based on surveys of the Bachu earthquake[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, 2012.
- [9] BOULANGER R W, IDRIS I M. Magnitude scaling factors in liquefaction triggering procedures[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2015, 79: 296—303.
- [10] ONOUE A, MORI N, TAKANO J. In-situ experiment and analysis on well resistance of gravel drains[J]. **Soils and Foundations**, 1987, 27(2): 42—60.
- [11] 袁晓铭, 曹振中. 砂砾土液化判别的基本方法及计算公式[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(4): 509—519.  
YUAN Xiao-ming, CAO Zhen-zhong. Fundamental method and formula for evaluation of gravel soil[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2011, 33(4): 509—519.
- [12] 李兆焱, 孙锐, 曹振中, 等. 静力触探法对巴楚地震液化判别的适用性[J]. 岩土力学, 2010, 31(12): 3907—3912.  
LI Zhao-yan, SUN Rui, CAO Zhen-zhong, et al. Feasibility of cone penetration test to evaluating Bachu earthquake liquefaction[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(12): 3907—3912.
- [13] 李兆焱, 袁晓铭, 曹振中, 等. 基于巴楚地震调查的砂土液化判别新方法[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(3): 483—489.  
LI Zhao-yan, YUAN Xiao-ming, CAO Zhen-zhong, et al. New evaluation formula for sand liquefaction based on survey of Bachu earthquake in Xinjiang[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2012, 34(3): 483—489.
- [14] 中华人民共和国建设部. GB50021—2001 岩土工程勘察规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.  
Ministry of Construction of the PRC. GB50021—2001 Code for investigation of geotechnical engineering[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2001.