

用静力触探评价饱和砂土的液化势

郭培军 李克钊

(西南交通大学土木工程系, 四川峨眉)

提 要

本文通过标定罐内的静力触探试验和循环三轴液化试验资料的对比, 讨论了用静力触探评价饱和砂土液化势的可行性与方法以及影响砂土液化势和静力触探贯入阻力的主要因素, 提出了判断砂土液化势的场地液化应力比和修正静力触探贯入阻力之间的相关曲线, 并同西特(Seed)和罗伯逊(Robertson)等人建议的曲线作了比较。最后, 用地震时场地液化与否的实际资料对其可靠性作了检验。

一、前 言

地震时, 由砂土液化造成的地面和建筑物的破坏极为严重。因此, 天然土层液化势的评价在土建工程设计中甚为重要。

目前, 用标准贯入试验评价饱和砂土液化势的经验性方法在国内外已被广泛接受, 并具有丰富的现场测试资料。但是, 在原位测试方法中, 一般认为静力触探的贯入阻力能更好地反映土的特性, 且静力触探具有贯入连续、测试简便、结果离散性小和人为因素小等优点。因此, 国内外不少学者正在对用静力触探判断砂土液化这一课题进行广泛的研究^[1,2], 但大都局限于现场宏观液化现象的调查研究, 或对标贯和静力触探试验资料进行统计分析。也有人对这一方法的适用范围提出了一些看法^[3]。因此, 有必要通过室内试验研究, 验证该方法的可行性与可靠性, 并对现场宏观调查和测试资料进行补充。

二、试样、试验设备与试验方法

试验采用四川灌县石英砂, 砂样的级配曲线见图1, 其主要物理性质指标列于表1。

(一) 饱和砂土液化试验

在DCT-76N型电磁式振动三轴仪上进行。试验采用西尔弗(Silver)建议的方法制备土样, 并采用二氧化碳加反压的饱和方法。所施加的循环荷载为正弦波形, 频率为1 Hz, 当残余孔压等于围压时停止加载。

(二) 室内静力触探试验

使用2 Y-16型双缸油压静力触探仪在柔性边界标定罐内进行。触探仪探头直径为35.9

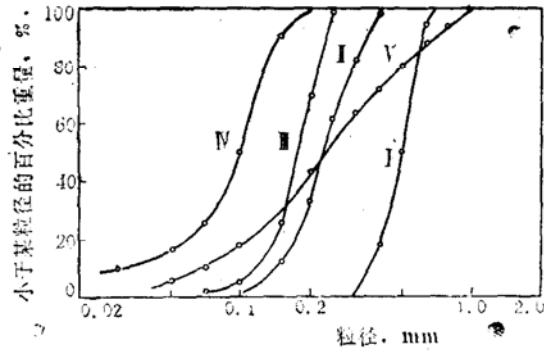
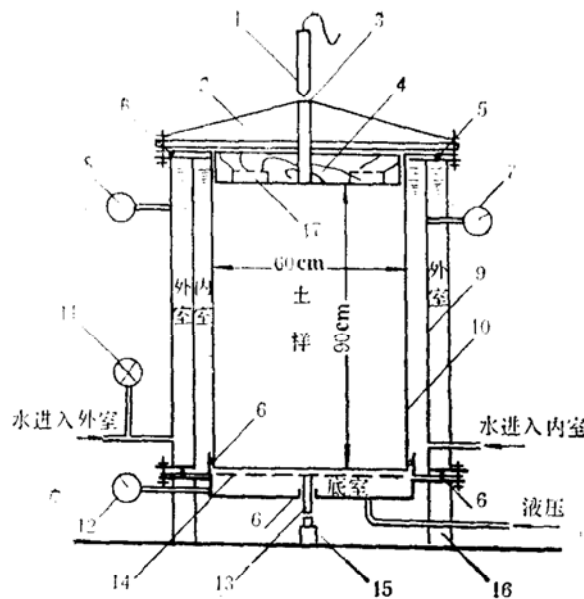


图1 试样级配曲线(S.B.S.标准筛)

表1 试样物理性质指标

| 试样编号 | 颗粒比重 | γ_{dmax} | γ_{dmin} | e_{max} | e_{min} | D_{10} | D_{50} | D_{60} | 不均匀系数 C_u |
|------|------|----------------------|-----------------|-----------|-----------|----------|----------|----------|-------------|
| | | (kN/m ³) | | | | (mm) | | | |
| I | 2.64 | 16.48 | 12.26 | 1.12 | 0.57 | 0.36 | 0.50 | 0.53 | 1.47 |
| II | | 16.09 | 11.97 | 1.16 | 0.61 | 0.14 | 0.23 | 0.25 | 1.78 |
| III | | 15.30 | 11.87 | 1.18 | 0.69 | 0.11 | 0.17 | 0.19 | 1.73 |
| IV | | 16.28 | 11.67 | 1.22 | 0.59 | 0.030 | 0.10 | 0.12 | 4.00 |
| V | | 18.54 | 13.54 | 0.91 | 0.40 | 0.071 | 0.23 | 0.30 | 4.23 |

mm, 贯入速度为1.2m/min; 标定罐的结构如图2所示, 土样直径与探头直径之比为16.8。试样的制备方法与三轴试验相同, 试样可利用铺设在标定罐底部的管路浸水饱和, 并在等向压力下固结。触探过程中, 保持土样边界上的应力不变, 但允许土样产生侧向和轴向变形。



- 1. 触探探头 2. 钢盖 3. 预留孔 4. 木盖 5. 螺栓 6. 密封圈 7. 内室压力表 8. 外室压力表 9. 内壁 10. 橡皮膜 11. 压力调节器 12. 竖向压力表 13. 活塞杆 14. 承托土样板 15. 千斤顶 16. 支座 17. 土压盒

图2 柔性壁标定罐示意图

三、试验结果分析

(一) 饱和砂土液化试验

我们对五种砂样作了不同围压下的循环三轴液化试验，部分试验结果示于图 3。影响饱和砂土液化强度的主要因素如下：

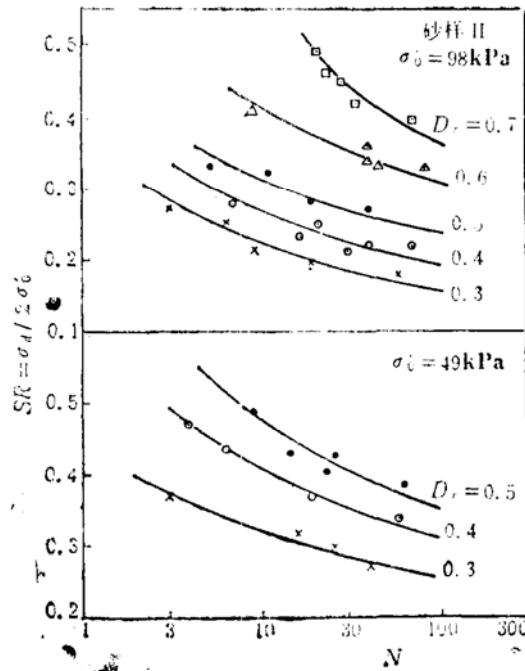


图 3 $\sigma_d/2\sigma_0'-N$ 关系曲线

1. 初始固结有效应力 σ_0'

当循环次数 N 一定时，试样发生液化所需的循环剪应力 $(\sigma_d/2)_l$ 随 σ_0' 的增大而增大，而循环剪应力比 $(\sigma_d/2\sigma_0')_l$ 却随 σ_0' 的增大而减小，如图 4 所示。

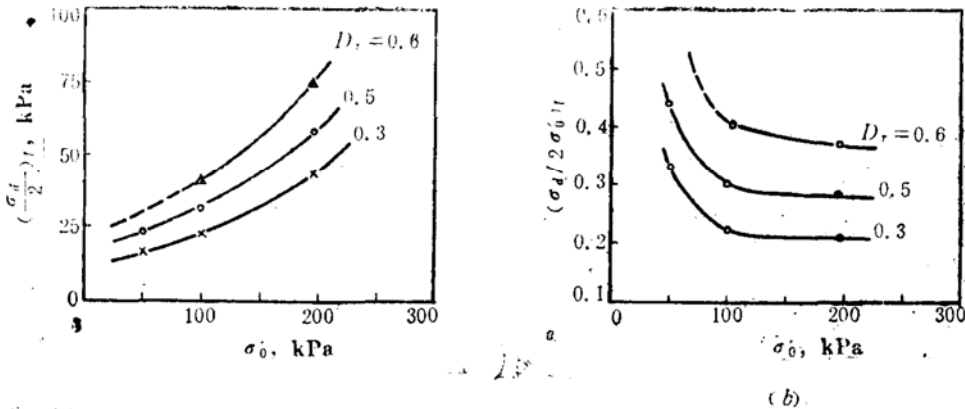


图 4 σ_0' 对 $(\frac{\sigma_d}{2})_l$ ， $(\frac{\sigma_d}{2\sigma_0'})_l$ 的影响(砂样 II, $N_0 = 10$)

为方便起见, 可将不同围压下的 $(\sigma_d/2\sigma'_0)_t$ 修正为 $\sigma'_0 = 98\text{kPa}$ 时的结果。设修正系数为

$$C_{SR} = SR_\sigma / SR_0 \quad (1)$$

式中 SR_σ 为 $\sigma'_0 = \sigma$ 时的液化应力比; SR_0 为 $\sigma'_0 = 98\text{kPa}$ 时的液化应力比; C_{SR} 可按图 5 取值, C_{SR} 随循环次数的变化不大。

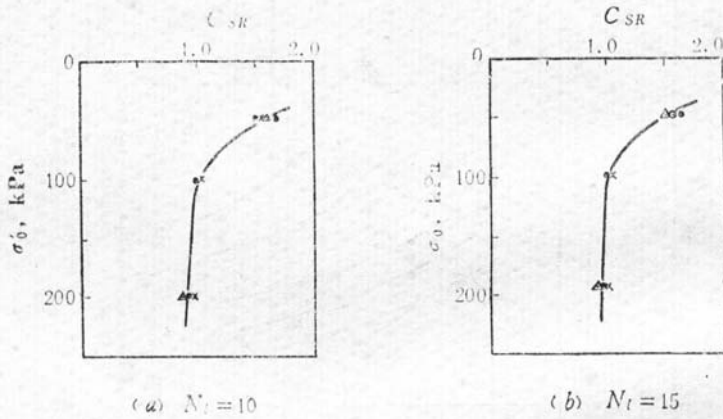


图 5 修正系数 C_{SR}

2. 相对密度 D_r

(1) 当 σ'_0 一定时, 砂样的某周液化应力比 $(\sigma_d/2\sigma'_0)_N$ 随 D_r 的增大而增大, 如图 3, 6 所示。

(2) 在循环荷载作用下, 当 $D_r < 0.5$ 时, 试样最终发生“液化”; 当 $D_r \geq 0.5$ 时, 试样产生“循环活动性”。

(3) $(\sigma_d/2\sigma'_0)_t$ 与 D_r 的关系和 σ'_0 有关。

3. 平均粒径 D_{50}

$N = 15$ 时, $(\sigma_d/2\sigma'_0)_t$ 随 D_{50} 的变化如图 7 所示。这里没有考虑橡皮膜楔入的影响。

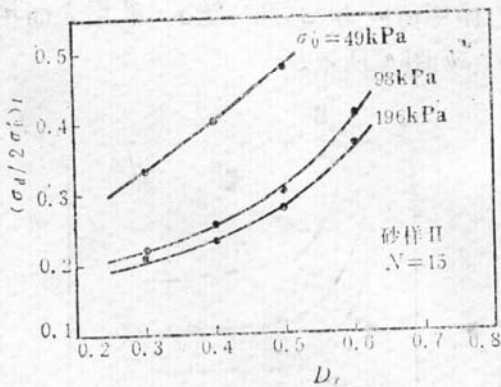


图 6 $(\sigma_d/2\sigma'_0)_t - D_r$ 曲线

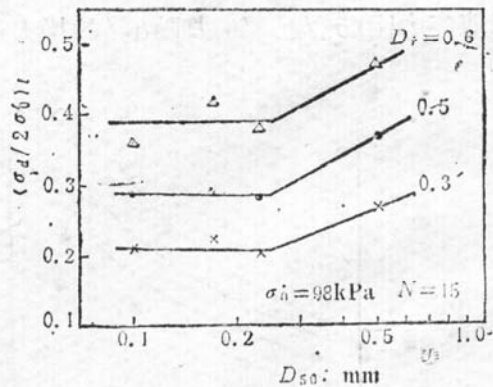


图 7 D_{50} 对 $(\sigma_d/2\sigma'_0)_t$ 的影响

4. 不均匀系数 C_u

图 8 是 $\sigma'_0 = 49\text{kPa}$ 时砂样 II, “V” 的试验结果, 这两种砂样的 D_{50} 均为 0.23mm , C_u 分别

为1.78和4.23。可以看出，当其它条件及 D_r 相同时，砂样V的液化应力比稍稍低于砂样II者。这表明，只说级配良好的砂土不易发生液化是含糊的。实际上， C_u 对砂土液化的影响主要表现在它对土样结构和相对密度的影响上，也就是说，与级配均匀的砂土相比，级配良好的砂土容易得到比较稳定的结构，其密度也可达到较大的数值，因而不易发生液化。

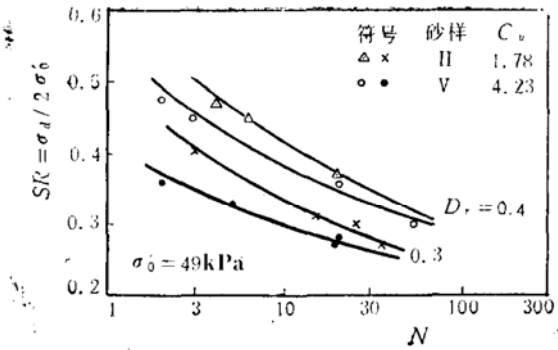


图 8 C_u 对 $(\sigma_d/2\sigma'_0)_l$ 的影响

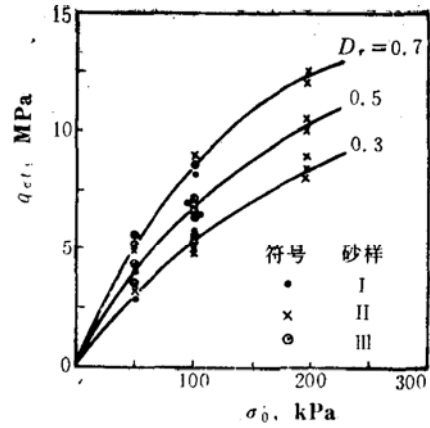


图 9 σ'_0 对 q_{cl} 的影响

(二) 室内静力触探试验

砂土的静力触探极限贯入阻力 q_{cl} 可表示为

$$q_{cl} = f(\sigma'_0, D_r, D_{50}, w \text{ 或 } S_r, I) \tag{2}$$

式中 I 为与土体结构有关的参数； w 为土样的含水量； S_r 为土样的饱和度；其它符号的意义同前。本试验中，我们对砂样 I，II 和 III 作了室内静力触探试验。影响 q_{cl} 的因素如下：

1. 围压 σ'_0

试验结果表明， σ'_0 对 q_{cl} 的影响很大。 q_{cl} 随 σ'_0 的增大而增大，但其增大的速率随 σ'_0 的增大而减小，如图 9 所示。

若将不同围压下的试验结果修正为 $\sigma'_0 = 98\text{kPa}$ 时的贯入阻力，并设修正系数为 C_Q ，则

$$Q_{cl} = C_Q \cdot q_{cl} \tag{3}$$

式中 Q_{cl} 为 $\sigma'_0 = 98\text{kPa}$ 时的极限贯入阻力。

C_Q 随 σ'_0 变化的试验结果如图10所示，图中实线为施默特曼(Schmertmann)建议的修正曲线^[2]，二者吻合得甚好。

试验结果还表明， D_r 对 C_Q 的影响很小。

2. 相对密度 D_r

q_{cl} 随 D_r 的增大而增大，如图11所示。对于本次试验所用砂样， q_{cl} 随 σ'_0 和 D_r 的变化可

表示为

$$q_{ct} = 130 \exp(1.19 D_r) \cdot (\sigma_0')^{0.72} \quad (\text{kPa}) \quad (4)$$

式中各符号的意义同前, σ_0' 的单位为 kPa。

3. 平均粒径和含水量

(1) 在本试验用砂的粒径范围内 ($D_{50} = 0.17 - 0.50 \text{mm}$), D_{50} 对 q_{ct} 的影响不大。图12为 $\sigma_0' = 98 \text{kPa}$, $D_r = 0.3$ 时三种砂样的触探曲线, 其极限贯入阻力的变化范围很小。

(2) 砂样的含水量对 q_{ct} 的影响也很小。图13为含水量不同时砂样 III 的触探曲线, q_{ct} 的变化范围为 $6.0 - 6.6 \text{MPa}$ 。

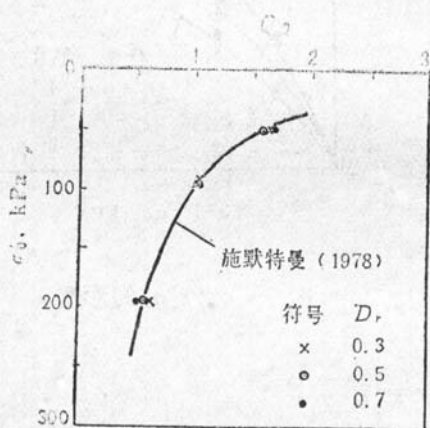


图10 贯入阻力修正系数 C_0

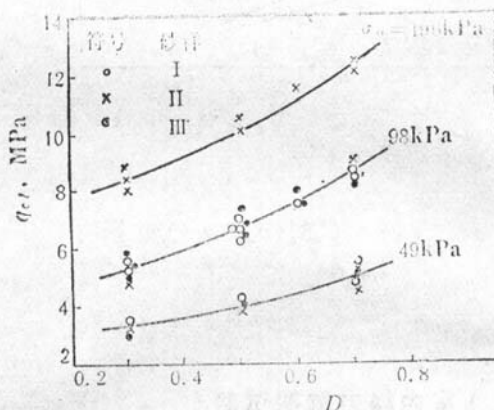


图11 D 对 q_{ct} 的影响

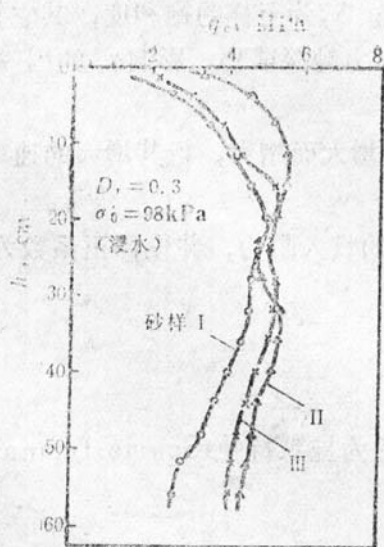


图12 不同砂样的触探曲线

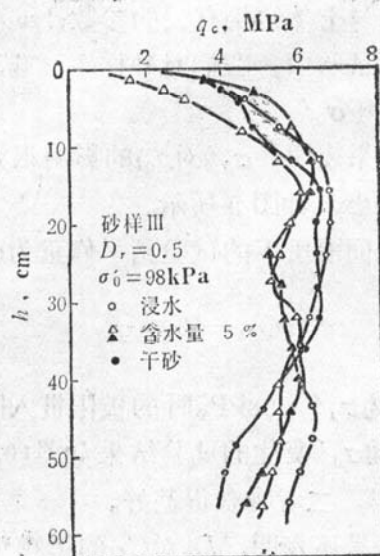


图13 含水量对贯入阻力的影响

(三) q_{cl} 与 $(\sigma_d/2\sigma'_0)_l$ 之间的关系

上述砂土液化试验和静力触探试验是在相同的条件下进行的，因此，可以直接建立 $(\sigma_d/2\sigma'_0)_l$ 与 q_{cl} 之间的关系。当 $N = 15$ (相当于7.5级地震)时， $(\sigma_d/2\sigma'_0)_l$ 与 q_{cl} 及 Q_{cl} 之间的关系见图14，可以看出，所有的试验数据点都分布在一很狭窄的范围内。 N 取其它数值时亦然。这说明，饱和砂土的某周液化应力比 $(\sigma_d/2\sigma'_0)_N$ 与触探贯入阻力之间确有一定的关系，用静力触探评价砂土的液化势是可行的。

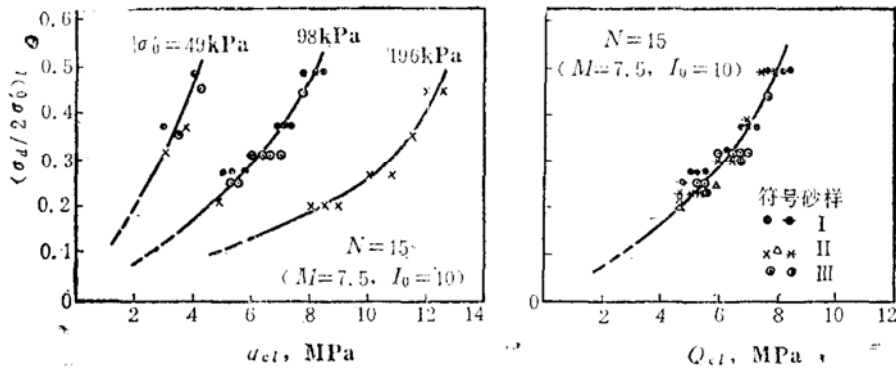


图14 $(\sigma_d/2\sigma'_0)_l$ - q_{cl} , Q_{cl} 曲线

四、用静力触探评价饱和砂土的液化势

(一) 室内试验结果的修正

由于室内试验条件和现场条件的差异，必须对室内试验结果进行修正才能得到能够反映现场情况的结果。

1. 循环三轴液化试验结果的修正

(1) 地震等效循环荷载和等效循环次数

目前，通常把地震随机荷载转换成等幅循环荷载 τ_{av} 及等效循环次数 N_{eq} 。若

$$\tau_{av} = 0.65\tau_{max} = 0.65 \frac{\gamma h}{g} \cdot a_{max} \cdot r_d \tag{5}$$

式中 τ_{max} 为自地面起高为 h 的土柱受到的最大地震剪应力； a_{max} 为地震时的地面最大加速度； γh 为 h 处的上覆压力； r_d 为地震剪应力折减系数。

则对于不同的震级，等效循环次数 N_{eq} 可按表2取值^[2]。

(2) 三轴液化试验结果的修正

设

$$\left. \begin{aligned} \frac{\tau_{av}}{\sigma'_{v0}} &= C_r \left(\frac{\sigma_d}{2\sigma'_0} \right)_{N_{eq}} \text{湿春} \\ C_r &= C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot C_4 \end{aligned} \right\} \tag{6}$$

表2 震级烈度与等效循环次数

| 震级 M | 震中烈度 I_0 | a_{max}/g | N_{eq} |
|--------|------------|-------------|----------|
| 8-1/2 | 12 | | 26 |
| 7-1/2 | 10 | | 15 |
| 6-3/4 | 9 | 0.40 | 10 |
| 6 | 8 | 0.20 | 5 |
| 5-1/2 | 7 | 0.10 | 4 |

注：表中震级 M 与震中烈度 I_0 ，按 $M = 0.58 I_0 + 1.5$ 换算。

式中

C_1 — C_4 分别为进行以下修正的修正系数：

$$\left(\frac{\sigma_d}{2\sigma'_0} \right)_{N_{eq}} \xrightarrow{\substack{\text{湿春} \\ C_1}} \left(\frac{\sigma_d}{2\sigma'_0} \right)_{N_{eq}} \xrightarrow{\substack{\text{砂雨} \\ C_2}} \text{大型振动台} \xrightarrow{\substack{\text{试验结果(单向)}}} \\ \xrightarrow{\substack{C_3 \text{ 大型振动台} \\ \text{试验结果(双向)}}} \xrightarrow{C_4} \frac{\tau_{av}}{\sigma'_{v0}}$$

根据西特(Seed)等人研究成果^[4]， C_r 与 D_r 无关，但随 N_{eq} 的不同而变化。 C_1 可按表3取值^[6]， $C_2 = 0.63$ ^[4]， $C_3 = 0.85$ ^[6]， $C_4 = 1.30$ ^[4]， C_r 的取值亦列于表3。

表3 三轴试验修正系数

| N_{eq} | 4 | 5 | 10 | 15 | 26 |
|----------|------|------|------|------|------|
| C_1 | 0.55 | 0.60 | 0.67 | 0.70 | 0.71 |
| C_r | 0.38 | 0.42 | 0.47 | 0.49 | 0.49 |

2. 室内静力触探贯入阻力的修正

室内触探结果与现场触探结果之间的差异主要由土体结构、应力状态、边界条件(包括试样尺寸)的不同引起。可设

$$\left. \begin{aligned} q_{cf} &= B_Q \cdot q_{cl} \\ B_Q &= B_1 \cdot B_2 \cdot B_3 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中 q_{cf} 为现场静力触探极限贯入阻力； B_1 ， B_2 ， B_3 为分别为土体结构、应力状态和边界条件修正系数。

(1) 土体结构修正系数 B_1

室内静力触探试验在人工制备的砂样中进行, 砂样的结构性较弱。而现场实际土体则经历了漫长的地质年代, 具有一定的结构性。许多研究表明^[6], 粉细砂原状土的强度与湿春法制备土样的强度之比为1.15—1.25, 故可取 $B_1 = 1.2$ 。

(2) 应力状态修正系数 B_2

室内触探试验是在等向固结压力 σ_0' 作用下进行的。若设土为各向同性体, 则可取 $B_2 = \frac{1}{3}(1 + 2K_0)$, 其中 K_0 为静止土压力系数, 可取为0.45, 故 $B_2 = 0.63$ 。

(3) 边界条件修正系数 B_3

试验边界条件的影响与试样的相对密度及试样尺寸有关。若砂样极松($D_r \leq 0.3$), 在触探过程中, 土中应力很少向四周传播, 土体发生冲切破坏, 当 $d_{\text{试样}}/d_{\text{探头}} = 17$ 时, 边界条件的影响不大^[7], 可取 $B_3 = 1.0$; 当 D_r 增大时, 探头的影响范围增大, 边界条件的影响亦增大。参考文献[7], 当 $D_r > 0.3$ 时, 取 $B_3 = 10D_r/3$ 。

根据以上建议的修正系数, 可得

$$B_Q = \begin{cases} 0.75, & D_r \leq 0.3 \\ 2.5D_r, & D_r > 0.3 \end{cases}$$

在本试验中, 修正后的静力触探极限贯入阻力, 即现场触探极限贯入阻力, 可表示为(当 $D_r \geq 0.3$ 时)

$$q_{cf} = 67 \cdot \exp(3.0D_r) \cdot (\sigma_{v0}')^{0.72} \quad (\text{kPa}) \quad (8)$$

此式还有待现场试验资料的进一步验证。

(二) 液化分界线的确定

由式(6), (7)及图14, 可得到 $M = 7.5$ 时现场等效循环液化剪应力比和静力触探极限贯入阻力之间的关系, 并确定液化分界线, 如图15所示。该图中同时给出了西特和罗伯逊等

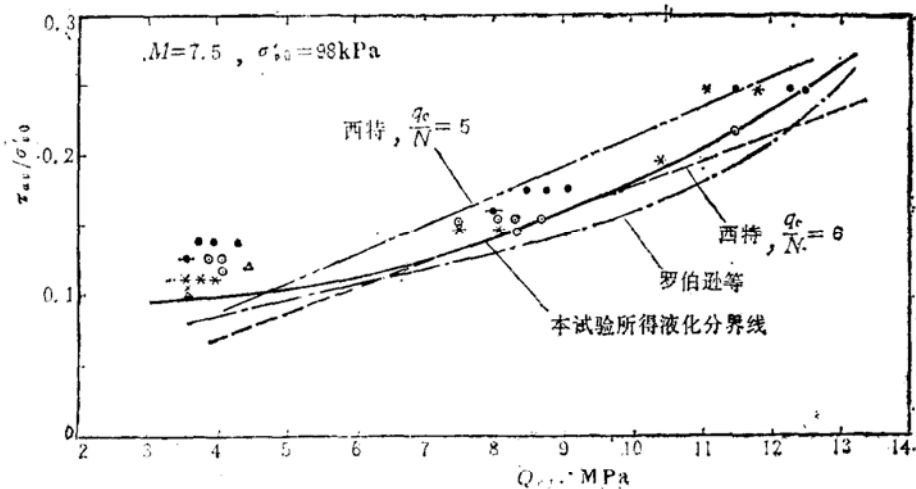


图15 液化分界线

人提出的液化分界线^[2,8]。可以看出, 本文的结果与罗伯逊等建议的曲线及 $q_c/N = 6$ 时西特的曲线非常接近。

(三) 本文结果与《工业与民用建筑抗震设计规范(TJ11-78)》公式的对比

假设天然砂层的砂样与试验所用砂样相同, 地下水埋深 $h_w = 2\text{m}$, 砂的容重取 $\gamma_{\text{湿}} = 17.6\text{ kN/m}^3$ (地下水位以上), $\gamma_{\text{饱}} = 18.6\text{ kN/m}^3$ (地下水位以下), 地震时地面最大加速度根据表 2 取值, 代入式(5)算出不同深度时的 τ_{av}/σ_{v0}' , 由图15求得发生液化时 $\sigma_{v0}' = 98\text{ kPa}$ 深度处的液化临界贯入阻力 Q_{cfl} , 再利用式(3), 则可求得不同深度处的临界贯入阻力 q_{cfl} 。七度和八度地震时 q_{cfl} 随深度的变化见图16。

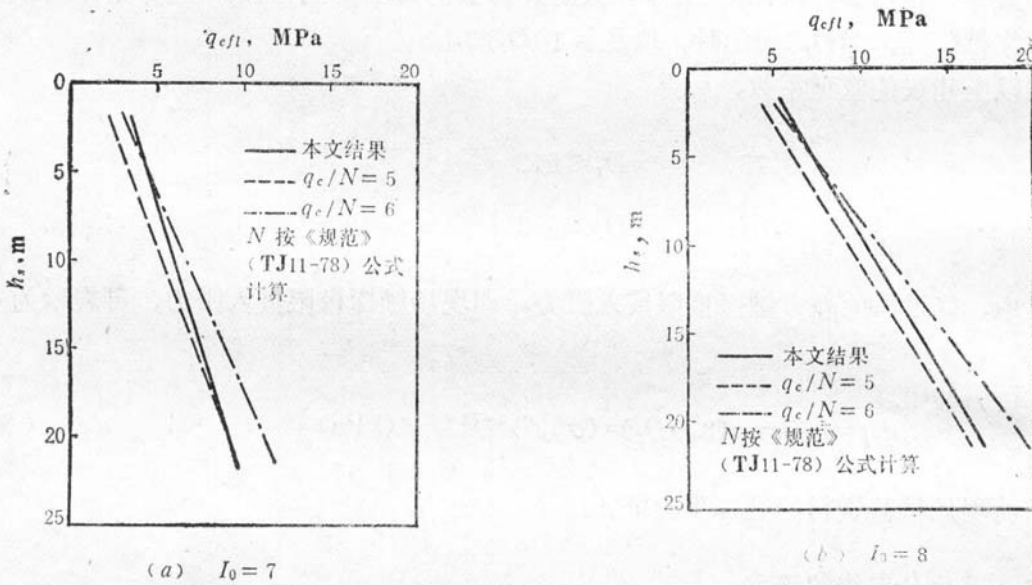


图16 液化临界贯入阻力随深度的变化

大量研究表明^[8,9], 对于细一中砂, ($D_{50} = 0.1-0.5\text{mm}$), 下列关系是可取的

$$n = q_c/N = 4 - 6 \tag{9}$$

式中 N 为标贯击数。若取 $n = 5, 6$, N 按《工业与民用建筑抗震设计规范(TJ11-78)》公式

$$N = N_0 [1 + \alpha_w(h_w - 2) + \alpha_s(h_s - 3)] \tag{10}$$

计算, 这时 q_{cfl} 随深度的变化亦示于图16。

(四) 本文结果与场地液化实际资料的比较

为了检验本文提出的液化分界线的可靠性, 笔者从国外的有关文献^[8,10]中收集了一些场地液化的实际资料, 如图17所示, 图中也示出了本文提出的液化分界线。可见, 用本文结果判断砂土液化的精确性是可以接受的。

五、结 语

1. 饱和砂土的循环三轴液化强度受到许多因素的影响,不可能用某单一参数表示出来。

2. 对于正常固结的洁净中、细砂,其静力触探极限贯入阻力与其抗液化强度之间确有一定的关系,用静力触探评价饱和砂土的液化势是可行的。

3. 本文根据室内试验资料的对比和分析,提出了判断饱和砂土液化与否的分界线,并且认为砂土的液化临界贯入阻力与上覆压力有关。

4. 本文在将室内试验结果 $(\sigma_d/2\sigma'_0)_{Neq}$ 和 q_{cl} 换算到 τ_{av}/σ'_{v0} 和 q_{cf} 时所采用的修正系数多根据国外文献资料得来,缺少国内的现场和室内试验的对比资料。此外,本试验中所用试样种类也有限,还有待其它各种土样试验的补充。

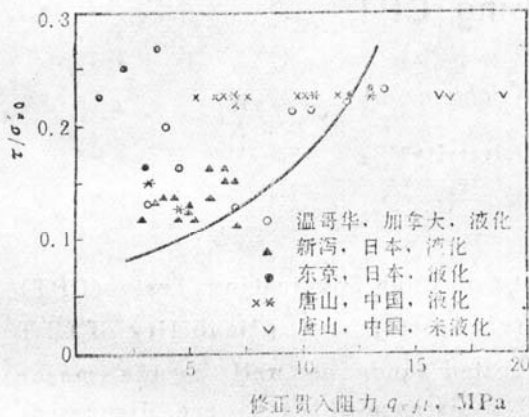


图17 场地液化的判断

参 考 文 献

- [1] 周神根,用静力触探判别砂土液化,岩土工程学报,1980年第3期。
- [2] Seed, H.B., Idriss, I.M., Arango, I., Evaluation of Liquefaction Potential Using Field Performance Data, J.Geotech. Eng. Div., ASCE, Vol.109, No. GT3, Mar., 1983.
- [3] Jamiolkowski, M., Baldi, G., Bellotti, R., Ghionna, V., Pasqualini, E., Penetration Resistance and Liquefaction of Sands, Proc. 11th Int. Conf. on SM FE, San Francisco, 1985, 8.
- [4] DeAlba, P., Seed, H.B., Chan, C.K., Sand Liquefaction in Large Scale Simple Shear Tests, J. Geotech. Eng. Div., ASCE., Vol.102, No.GT9, Sept., 1976.
- [5] Mulilis, J.P., Seed, H. B. Chan, C. K., Effects of Sample Preparation on Sand Liquefaction, J. Geotech. Eng. Div., ASCE., Vol. 103, No. GT2, Feb., 1977.
- [6] Seed, H.B., Pyke, R.M., Martin, G.R., Effect of Multidirectional Shaking on Pore Pressure Development in Sands, J. Geotech. Eng. Div., ASCE., Vol. 104, No.GT1, Jan., 1978.
- [7] Parkin, A.K., Lunne, T., Boundary Effects in the Laboratory Calibration of Cone Penetration for Sand, Proc. 2nd ESOPT, Amsterdam, 1982.
- [8] Robertson, P.K., Campanella, R.G., Liquefaction Potential of Sands Using CPT, J. Geotech. Eng. Div., ASCE, Vol. 111, No. GT3, Mar, 1985.
- [9] G.桑格列拉,地基土触探法,四川省建筑工程局建筑科学研究所译,中国建筑工业出版社,

1975。

[10] 刘恢先, 唐山大地震震害, 第一册, 地震出版社, 1985。

Evaluation of Liquefaction Potential of Saturated Sands Using CPT

Guo Peijun Li Kechuan

(Southwestern Jiaotong University)

Abstract

In this paper, by means of comparing the data of Cone Penetration Tests (CPT) in calibration chamber with those of cyclic triaxial tests, the applicability of CPT for evaluating the liquefaction potential of saturated sands as well as the major factors affecting liquefaction potential and CPT resistance of sands are discussed, and the correlation between field cyclic stress ratio causing liquefaction and modified cone resistance is proposed and compared with the correlations proposed by Seed and Robertson et al. Finally, the reliability of the proposed correlation is examined with field data for sites which have liquefied or not liquefied during earthquakes.