

# 饱和土液化的判别方法\*

刘 颖 李大华

(国家地震局工程力学研究所, 哈尔滨)

**提 要** 本文对我国TJ11—74规范的液化判别方法进行了讨论, 指出它在很多情况下, 判别结果偏于保守, 根据唐山地震饱和土液化的现场勘察资料, 对上述液化判别方法进行了修正, 给出了基准N值与地震烈度及震级的关系, 确定了地下水位及饱和土埋深的影响系数, 探讨了土中粘粒的影响, 修正后的液化判别式, 在一般情况下, 都可以给出符合实际的结果。

**关键词** 地震工程 饱和土液化判别

## 一、前 言

1966年至1976年的10年间, 在我国北部地区, 先后发生了3次大地震。这些地震都在广大区域内引起了大规模的饱和土液化, 造成了严重的震害。当然, 这些地震也为制定、检验和修正饱和土液化的判别方法提供了条件。

我国TJ11—74规范的液化判别方法<sup>[1]</sup>, 主要是根据1966年邢台7.2级地震的液化现场勘察资料制定的。1975年海城7.3级地震经验表明, TJ11—74规范的液化判别方法, 无论对液化或不液化场地, 都可给出很高的判别成功率<sup>[2]</sup>。但1976年唐山7.8级地震经验表明, 上述液化判别方法, 在很多情况下, 却给出了偏于保守的判别<sup>[3]</sup>。这种情况的产生, 主要取决于地震震级及震区的地质、土质条件的异同。TJ11—78规范沿用了TJ11—74规范的液化判别方法, 但根据唐山地震的初步经验, 对该方法的应用范围加以限制<sup>[4]</sup>。GBJ11—89规范吸收了唐山地震后液化研究的某些成果<sup>[5]</sup>, 以适当的方式表达了震级及土中粘粒对液化的影响, 但沿用了TJ11—74规范液化判别式的线性形式, 给出的判别结果, 在一些情况下, 仍然偏于保守<sup>[1]</sup>。可见, 还有必要利用唐山地震液化现场勘察资料, 对液化判别方法进一步进行研究。

## 二、TJ11—74规范液化判别式的根据和局限性

### 1. TJ11—74规范液化判别式的根据

TJ11—74规范液化判别式主要是根据1966年邢台地震液化现场勘察资料建立的, 有下述3个步骤。

(1) 根据现场勘察资料找出饱和土标准贯入点深度 $d_s=3$  m和地下水位深度 $d_w=2$  m时, 对应于设防烈度Ⅷ、Ⅸ、Ⅹ度的液化临界标准贯入锤击数, 称之为基准N值, 以 $N_0$ 表示, 结果如下:

\* 地震科学联合基金资助(960020)

本文1992年1月8日收到

1) 建设部抗震办公室, 1990, 建筑抗震设计规范GBJ11—89统一培训教材。

设防烈度	基准值 ( $N_0$ )
Ⅵ	6
Ⅶ	10
Ⅷ	16

(2) 设想在特定的设防烈度下, 饱和土层可能发生液化的深度内, 待求的液化临界  $N$  值 (以  $N'$  表示), 与标准贯入点深度  $ds$  及地下水位深度  $dw$  之间存在某种函数关系:

$$N' = f(ds, dw) \quad (1)$$

以  $N_0$  值为基点, 在  $ds = 3 \text{ m}$ ,  $dw = 2 \text{ m}$  条件下, 将式 (1) 展开, 只取到线性项, 可以得到下式:

$$N' = f_0 + \frac{\partial f}{\partial ds} (ds - 3) + \frac{\partial f}{\partial dw} (dw - 2) \quad (2)$$

由步骤 (1) 可知, 当  $ds = 3 \text{ m}$ ,  $dw = 2 \text{ m}$  时,  $f_0 = N_0$ , 于是式 (2) 可写为

$$N' = N_0 + \frac{\partial f}{\partial ds} (ds - 3) + \frac{\partial f}{\partial dw} (dw - 2) \quad (3)$$

当  $dw = 2 \text{ m}$  时, 可得

$$\frac{\partial f}{\partial ds} = \frac{N' - N_0}{ds - 3} \quad (4)$$

同理, 当  $ds = 3 \text{ m}$  时, 可得

$$\frac{\partial f}{\partial dw} = \frac{N' - N_0}{dw - 2} \quad (5)$$

由式 (4)、(5) 可知,  $\partial f / \partial ds$ ,  $\partial f / \partial dw$  分别为在给定的设防烈度下由标准贯入深度及地下水位深度变化引起的  $N'$  值变化率。由于  $N_0$  值因设防烈度而异, 因而当设防烈度变化时, 这两个值也随之改变。

(3) 将式 (3) 改写如下:

$$N' = N_0 \left[ 1 + \frac{1}{N_0} \frac{\partial f}{\partial ds} (ds - 3) + \frac{1}{N_0} \frac{\partial f}{\partial dw} (dw - 2) \right] \quad (6)$$

令

$$\alpha = \frac{1}{N_0} \frac{\partial f}{\partial ds} = \frac{1}{N_0} \frac{N' - N_0}{ds - 3} \quad (7)$$

$$\beta = \frac{1}{N_0} \frac{\partial f}{\partial dw} = \frac{1}{N_0} \frac{N' - N_0}{dw - 2} \quad (8)$$

从而可将式 (6) 写成如下的形式:

$$N' = N_0 [1 + \alpha (ds - 3) + \beta (dw - 2)] \quad (9)$$

式 (9) 中系数  $\alpha$ ,  $\beta$  已经用  $N_0$  归一化, 都是与设防烈度无关的常数, 但由于式 (7)、(8) 中含有待求的未知数  $N'$ , 所以, 不能直接据以确定它们的值。但  $\alpha$ ,  $\beta$  值可以利用现场勘察资料根据液化与不液化的分界线确定。

对于液化场地, 实测  $N$  值必然小于  $N'$  值, 从而可知:

当  $dw = 2 \text{ m}$  时,

$$\frac{1}{N_0} \frac{N - N_0}{ds - 3} = \alpha^* < \frac{1}{N_0} \frac{N' - N_0}{ds - 3} = \alpha \quad (10a)$$

当  $ds = 3 \text{ m}$  时,

$$\frac{1}{N_0} \frac{N - N_0}{dw - 2} = \beta^* < \frac{1}{N_0} \frac{N' - N_0}{dw - 2} = \beta \quad (10b)$$

相反, 对于不液化场地, 实测  $N$  值必然大于  $N'$ , 从而可知:

当  $dw = 2 \text{ m}$  时,

$$\frac{1}{N_0} \frac{N - N_0}{ds - 3} = \alpha^* > \frac{1}{N_0} \frac{N' - N_0}{ds - 3} = \alpha \quad (11a)$$

当  $ds = 3 \text{ m}$  时,

$$\frac{1}{N} \frac{N - N_0}{dw - 2} = \beta^* > \frac{1}{N_0} \frac{N' - N_0}{dw - 2} = \beta \quad (11b)$$

可见, 利用式 (10a) 及 (11a) 可以确定土埋深影响系数  $\alpha$  之值; 利用式 (10b) 及 (11b) 可以确定地下水位埋深影响系数  $\beta$  之值。但由于当时资料不足, 式 (9) 中系数  $\alpha, \beta$  是参照 Seed 的方法求出的。取  $\alpha = 0.125, \beta = -0.05$ , 代入式 (9) 即得 TJ11—74 规范的砂土液化判别式。

## 2. TJ11—74 规范液化判别式的局限性

TJ11—74 规范液化判别式形式简单, 应用方便, 反映了主要的液化影响因素。1975 年海城地震现场勘察表明, 无论液化或不液化场地, 它都可以给出符合实际情况的判别结果。这可能是由于海城地震的震级, 震区的地质、土质条件与邢台地震比较接近的缘故。但唐山地震的震级, 沿海地区的地质、土质条件与邢台地震差异较大, TJ11—74 规范液化判别式在很多情况下给出了偏于保守的判别。研究表明, 它主要具有下述的局限性:

(1) TJ11—74 规范液化判别式通过  $N_0$  值与设防烈度联系起来, 但当时采用的资料, 主要得自 1966 年邢台地震, 震级 ( $M=7.2$ ) 较低, 当震级较高时会给出偏于保守的判别;

(2) TJ11—74 规范液化判别式是以  $ds = 3 \text{ m}, dw = 2 \text{ m}$  时的  $N_0$  值为基点进行线性展开, 这种线性化对埋深较大的砂土会给出偏于保守的判别;

(3) TJ11—74 规范液化判别式所依据的资料, 几乎都是纯净的砂土, 没考虑粘粒影响, 对含粘粒较多的土会给出偏于保守的判别。

唐山地震揭示了 TJ11—74 规范液化判别式的局限性, 同时也为克服这种局限性提供了条件。

## 三、基准 $N$ 值与烈度及震级的关系

用于本项分析的资料<sup>2)</sup>, 液化区的地下水位深度为 1—3 m, 标贯深度为 1—13 m; 不液化区的地下水位深度为 1—7 m, 标贯深度为 1—20 m。为消除土及地下水位埋深的随机影响, 将实测  $N$  值按下式修正为地下水位深度为 2 m, 土所处深度为 3 m 的  $N_1$  值。

$$N_1 = \left( 1 - 1.25 \log \frac{\sigma_0'}{\sigma_1'} \right) N \quad (12)$$

2) 唐山地震砂土液化联合研究小组, 唐山地震砂土液化现场勘察资料研究报告, 1983,

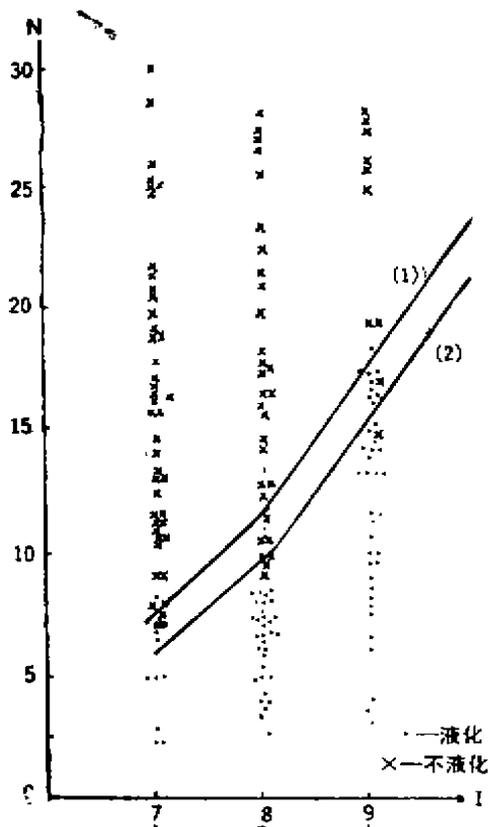


图1  $N_1$ 值的散点图

Fig. 1 Scattergram of  $N_1$  value

式中,  $\sigma_0'$  为标贯深度处土层的有效覆盖压力,  $\sigma_1'$  为地下水位深度为 2 m 时地下 3 m 处土层的有效覆盖压力。

按烈度作  $N_1$  值的散点图, 如图 1 所示。从图 1 可以看出, 在液化  $N_1$  值与不液化  $N_1$  值之间, 有一个两者并存的条带。在此条带内各取一点, 使液化与不液化的判别成功率都比较高且互相接近, 则可得与烈度 VII、VIII、IX 度的基准  $N$  值, 分别为 8、12、18, 如图 1 中曲线 (1) 所示。TJ11—74 规范的基准  $N$  值, 大体上为各烈度不液化  $N_1$  值的下限, 如图中曲线 (2) 所示。这种差异的产生, 可能是由于 1976 年唐山地震的震级比较高的缘故。根据上述分析, 建议对应于烈度 VII、VIII、IX 度, 当震级  $M \leq 7.5$  (或近震) 时,  $N_0$  值取 6、10、16, 当  $M > 7.5$  (或远震) 时,  $N_0$  值取 8、12、18。基于这种规律性, 可以把基准  $N$  值与烈度及震级的关系用下式表示:

$$N_0 = \left( \frac{I}{4.4} \right)^{3.88} + 2n \quad (13)$$

式中, 近震时  $n=0$ , 远震时  $n=1$ 。

须知, 烈度 VII 度区液化可能性虽然小, 但 VII 度区出现的几率高、面积大, 它的液化问题不容忽视; X 度区出现的几率和面积虽然小, 但液化可能性大, 它的液化问题理应考虑。确定这两种烈度的液化基准值, 目前尚缺乏资料。利用式 (13), 进行外推, 可以给出可供参考的液化基准值: VII 度时, 近震为 3, 远震为 5, X 度时, 近震为 24, 远震为 26。GBJ11—89 规范没有给出 VII、IX (远震)、X 度的  $N_0$  值。

#### 四、地下水位及饱和土深度的影响

根据地震现场调查, 液化区地下水位深度极少超过 5 m, TJ11—74 规范液化判别式把地下水位的基点取为 2 m, 大致位于中间。看来, 把地下水位深度影响系数  $\beta$  取为常数, 不会招致大的误差, 问题是  $\beta$  值的符号和大小是否妥当。利用前述的唐山地震砂土液化资料, 根据式 (10b) 和 (11b) 计算液化和不液化的  $\beta$  值, 其结果如图 2 所示。由图 2 可以看出, TJ11—74 规范液化判别式中  $\beta$  值的符号 (为负) 是正确的, 大小 (0.05) 也在合理的范围内 (图 2 中虚线)。据此看来, 无须对 TJ11—74 规范液化判别式的  $\beta$  值进行修正。

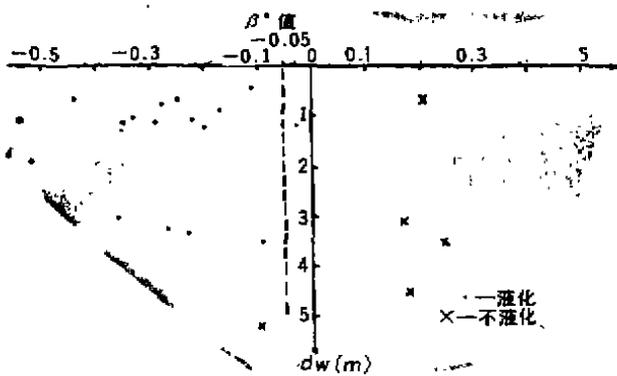


图2  $\beta^*$ 值的散点图  
Fig. 2 Scattergram of  $\beta^*$  value

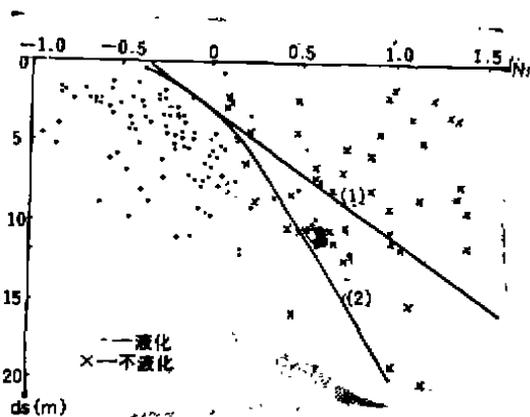


图3  $\alpha^*$ 值的散点图  
Fig. 3 Scattergram of  $\alpha^*$  value

分界线的液化侧。图3中曲线(2)为饱和土深度影响的非线性轨迹,它是根据沿整个液化深度都可以给出较高的液化判别和不液化判别成功率的要求确定的。考虑原有基础,这种非线性可表示为如下形式:

$$N_r = 0.125 (ds - 3) ds^{-0.25} \quad (15)$$

从而,砂土液化判别式可表示为如下形式:

$$N' = N_0 [1 + 0.125 (ds - 3) ds^{-0.25} - 0.05 (dw - 2)] \quad (16)$$

GBJ11—89规范的液化判别式的饱和土深度影响系数为常数,对于埋深较大的土会给出偏于保守的判别。

## 五、粘粒含量的影响

大量的实验表明,砂土随着粘粒含量的增加,抗液化强度会增高,而标准贯入试验N值反而会降低,因而直接用规范液化判别式对这类土的液化可能性进行评价,会导致偏于保守的误判,要解决这个问题,就须研究粘粒含量与标准贯入试验N值之间的关系(它与地震无

如前所述,由于地下水位深度的变化范围小,把地下水位深度影响系数取为一个合理的常数是适宜的,但是,可液化土深度的变化范围是比较大的,最大液化深度可达地表下20m。这样,用线性规律来考虑饱和土深度的影响,当液化深度与基准点深度相比较小时,可能产生不能容许的误差。为此,利用同样的唐山地震砂土液化资料,探讨饱和土深度影响系数 $\alpha$ 的形式。确定系数 $\alpha$ 的形式时,虽然可以利用式(10a)及(11a),但由于地下水位深度影响系数 $\beta$ 值已经确定,直接利用式(9)更为方便。为了集中地利用资料,将Ⅵ、Ⅶ、Ⅷ、Ⅹ度场地的实测N值按下式进行处理:

$$N_r = \frac{N}{N_0} + 0.05 (dw - 2) - 1 \quad (14)$$

式中 $N_0$ 值对应各烈度分别取8、12、18、24。图3为 $N_r$ 值沿饱和土深度的散点图。图3中曲线(1)为TJ11—74规范液化判别式中饱和土深度影响系数 $\alpha$ 值的线性轨迹。可以看出,在深层部位,相当多的不液化点位于该

关), 以及粘粒含量与以标准贯入试验N值表示的抗液化强度之间的关系(它与地震有关),

并把两者恰当地结合起来。分析所用的资料<sup>3)</sup>是在唐山地震后于天津市区取得的, 计37个场地, 91组数据, 均系粉土, 颗粒分析未加分散剂。

从上述资料可以看出: (a) 地下水位及饱和土埋深都可以看作是随机的, 并且与粘粒含量百分数 $p_c$ 无关; (b) 实测N值随粘粒含量增加而减少, 其平均值曲线类似某种双曲线。考虑这种基本事实, 在双对数坐标系上, 以粘粒含量百分数的倒数 $P_v (=1/p_c)$ 为横轴, 以标准贯入试验N值为纵轴, 作散点图, 如图4所示。

假定各种影响因数可以分离开来并表示为如下的乘积形式:

$$N_i = f_1(p_{vi}) \cdot f_2(ds_i) \cdot f_3(dw_i) \cdot f_4(D_i) \quad (17)$$

式中, 角标*i*表示各影响因数的序号, *D*为土的相对密度, 其余符号同前。

令 $(N_{100})_i$ 为 $p_v$ 等于100时的N值, 从而可写出下式:

$$(N_{100})_i = f_1(100) \cdot f_2(ds_i) \cdot f_3(dw_i) \cdot f_4(D_i) \quad (18)$$

以式(18)除式(17)的两边, 可得下式:

$$\frac{N_i}{(N_{100})_i} = \frac{f_1(p_{vi}) \cdot f_2(ds_i) \cdot f_3(dw_i) \cdot f_4(D_i)}{f_1(100) \cdot f_2(ds_i) \cdot f_3(dw_i) \cdot f_4(D_i)} \quad (19)$$

在一般情况下,  $i \neq j$ , 这是随机不等情况, 不予考虑。在特殊情况下,  $i = j$ , 这是随机相等情况, 在这种情况下, 式(19)中各种随机因素被消除, 故可得到下式:

$$\frac{N_i}{(N_{100})_i} = \frac{f_1(p_{vi})}{f_1(100)} \quad (20)$$

式(20)表明, 消除各种随机因素后, 在N值与粘粒含量之间存在着明确的函数关系。我们知道, 通过求平均值可以消除随机因素的影响, 所以, 可以认为, 式(20)是平均线表达式的一般形式。为求式(20)的具体函数形式, 分别定出不液化和液化N值的平均线, 如图4中直线(1)和(2)所示。因为图4中直线(1)和(2)具有同样形式的表达式, 即式(20), 所以, 它们应互相平行, 从而可以写出它们的具体表达式:

$$(N)_u = (N_1)_u P_v^n \quad (21)$$

$$(N)_L = (N_1)_L P_v^n \quad (22)$$

式中,  $(N_1)$ 为粘粒含量百分数的倒数 $p_v$ 等于1时的N值;  $n$ 为图4中直线的斜率; 角标u及L分别表示不液化及液化。对式(21)、(22)进行归一化, 可得:

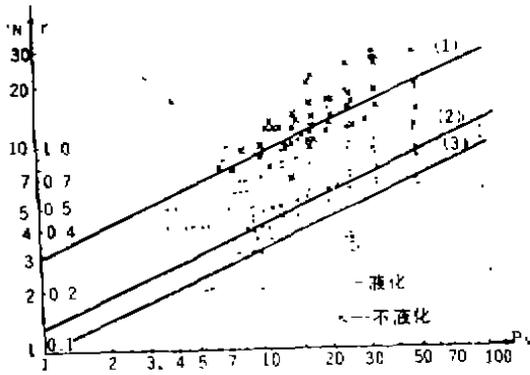


图4 N值的散点图

Fig. 4 Scattergram of N value

3) 天津市工程地质处, 轻亚粘土液化资料, 1981,

$$\frac{(N)_u}{(N_{100})_u} = \frac{(N_1)_u}{(N_{100})_u} p_v^n \quad (23)$$

$$\frac{(N)_L}{(N_{100})_L} = \frac{(N_1)_L}{(N_{100})_L} p_v^n \quad (24)$$

由图 4 可知:

$$\frac{(N_1)_u}{(N_{100})_u} = \frac{(N_1)_L}{(N_{100})_L} = \gamma_1 \quad (25)$$

由式 (23)、(24)、(25) 可知:

$$\frac{(N)_u}{(N_{100})_u} = \frac{(N)_L}{(N_{100})_L} = \gamma = \gamma_1 p_v^n \quad (26)$$

式 (26) 是要寻求的粘粒含量与标准贯入试验 N 值之间的关系。同时, 式 (26) 提示, 归一化后, 不液化平均线与液化后平均线重合, 如图 4 中直线 (3) 所示。这一点很重要, 因为分界线处于不液化平均线与液化平均线之间, 也具有同样形式的表达式, 所以, 归一化后的分界线也必与直线 (3) 重合, 即式 (26) 也适用于分界线, 从而可找到粘粒含量与以标准贯入试验 N 值表示的抗液化强度之间的关系:

$$\frac{N_c}{N_0} = \frac{(N)}{N_{100}} = \gamma = \gamma_1 p_c^n \quad (27)$$

式中,  $N_c$  为含有有一定粘粒的粉土的基准值。当  $p_c = 100$  时,  $(N) = N_{100}$ , 由式 (27) 可知:

$$\gamma_1 \times 100^n = 1 \quad (28)$$

由图 4 中直线 (3) 在纵轴上的截距可以求得  $\gamma_1 = 0.1$ , 将其代入式 (28) 则得:

$$100^n = 10,$$

从而可得  $n = 0.5$ 。将  $\gamma_1$  及  $n$  之值代入式 (27), 则得:

$$\frac{N_c}{N_0} = 0.1 p_c^{0.5} \quad (29)$$

或 
$$N_c = N_0 \left( \frac{1}{p_c} \right)^{0.5} \quad (30)$$

考虑分散剂 (六偏磷酸钠) 的影响, 须采用下式:

$$N_c = N_0 \left( \frac{3}{p_c} \right)^{0.5} \quad (31)$$

将式 (31) 与式 (16) 结合起来, 则得适用于砂土和粉土的液化判别式:

$$N' = N_0 [1 + 0.125(ds - 3)ds^{-0.25} - 0.05(dw - 2)] \left( \frac{3}{p_c} \right)^{0.5} \quad (32)$$

也可以利用式 (13), 将烈度直接引进液化判别式, 将其表示为如下的形式:

$$N' = \left[ \left( \frac{1}{4.4} \right)^{3.5} + 2n \right] [1 + 0.125(d_s - 3)d_s^{-0.25} - 0.05(dw - 2)] \left( \frac{3}{p_c} \right)^{0.5} \quad (33)$$

## 六、结 语

TJ11—74规范的液化判别式对震级不超过7.5, 级埋深不超过5m, 粘粒含量不超过3%的砂土的液化判别, 可给出符合实际情况的结果, 否则判别结果偏于保守。GBJ11—89规范的液化判别式克服了上述TJ11—74规范液化判别式的某些局限性, 但由于沿用了它的线性形式, 致使对埋藏较深的饱和土的液化判别, 仍然偏于保守, 其适用的深度范围不超过10m。对埋深10~20m的可液化土层也应进行液化判别。此外, VI度区的液化问题不容忽视, X度区的液化问题更应考虑。本文给出的液化判别式, 有助于解决这些问题。

### 参 考 文 献

- (1) 工业与民用建筑抗震设计规范TJ11—74, 1974。
- (2) 刘颖, 谢君斐等, 1984, 砂土震动液化, 地震出版社。
- (3) 刘颖, 1986, 论建筑抗震设计规范砂土液化判别式的修正与验证, 全国土工建筑物及地基抗震学术讨论会论文汇编。
- (4) 工业与民用建筑抗震设计规范TJ11—78, 1979。
- (5) 建筑抗震设计规范GBJ11—89, 1989。

## METHOD FOR DISTINGUISHING LIQUEFACTION OF SATURATED SOILS

Liu Ying and Li Dahua

(Institute of Engineering Mechanics, SSB)

[Abstract] A method for distinguishing sand liquefaction given by the Chinese Code TJ 11-74 is discussed and some limitation in it is pointed out in this paper. This method has been revised on the basis of the information of soil liquefaction during 1976 Tangshan earthquake. As a result, a relationships among the fundamental value of  $N$ , earthquake magnitude and intensity are given and the influence coefficients for depth of ground water level and saturated soil are determined and the influence of clayey particles is discussed. The revised method can give a result which conforms to the reality in general case.

[Key words] Earthquake engineering, Distinction of liquefaction of saturated soils