

# 饱和砂土液化判别方法中问题浅析\*

刘金韬 金晓媚

(中国矿业大学北京校区 北京 100083); (中国地质大学环境科学系 北京 100083)

**摘要** 国内外各种勘察规范中所列判别砂土液化的方法很多,但其效果如何,很难得到验证,笔者利用唐山地震砂土液化资料对几种目前较为常用、有代表性的方法进行了回判分析,指出了这些方法中存在的问题,并阐述了影响液化的主要因素。

**关键词** 标准贯入临界击数 剪应力比 比贯入阻力 周期抗剪系数

中图分类号: P315.9 文献标识码: A

## PRELIMINARY ANALYSIS OF THE METHODS FOR DISCRIMINATION OF SANDY SOIL LIQUEFACTION

LIU Jin-tao JIN Xiao-mei

(Beijing Campus, China University of Mining and Technology, Beijing 100083)

(China University of Geosciences, Beijing 100083)

**Abstract** Discussing some representative methods for discrimination of sandy soil liquefaction, the paper points out the questions existing in these methods, and then the main relevant factors affecting sandy soil liquefaction is analyzed.

**Key words** Critical standard penetration hammer, Ratio of shear stress, Ratio of penetration resistance, Periodic shear coefficient

## 1 引言

地震砂土液化是饱和粉细砂及轻亚粘土所面临的一个实际工程问题,一旦发生液化就会产生一系列地面及地下的破坏效应而带来灾害,因此,在工程勘察中一般对地震烈度Ⅶ度以上及一定埋深以内的饱和粉细砂土层都要进行液化判别。就判别方法而言,目前不少于数十种,比较成熟已被列入国内外各种规范的也有十几种。

虽然在工程勘察中按照有关规范所要求的方法

对砂土层进行了液化判别,但其效果如何却很少被注意,原因是这项工作不容易被验证,只有当一个地区发生震级足够大的地震之后,这一地区以前有关砂土液化判别的资料才有可能被验证。从目前已有的资料来看,地震后的液化实际情况与以往的判别还是有出入的,尤其对强震,各种判别方法几乎都“失灵”。本文想就现行国内外规范中所列的几种有代表性的判别方法进行讨论,发表一些自己的看法。

## 2 几种现行规范判别方法评述

\* 收稿日期: 1999-10-22; 收到修改稿日期: 1999-12-27.

第一作者简介: 刘金韬(1964-), 男, 博士, 从事地质灾害及工程地质问题的研究

## 2.1 标准贯入临界击数判别法

标准贯入临界击数法是我国研究工作者根据地震调查资料建立的判别砂土液化的一种方法,被《工业与民用建筑抗震设计规范》(TJ11-78)所采纳,是我国目前最常用的方法之一。标准贯入临界击数是指在一定地震烈度条件下,饱和砂土从发生液化到不发生液化的临界点所对应的标准贯入击数。在规范中规定了饱和砂土所处深度为3m、地下水位为2m时,不同设计烈度情况下的标准贯入临界击数值见表1。

表1 不同烈度条件下的标准贯入临界击数值

Table 1 Critical number of standard penetration hammers  $\bar{N}$  at different seismic intensities

设计地震烈度	VII	VIII	IX
标准贯入临界击数	6	10	15

当某一砂土层埋藏的地质条件与上述规定不同时,标准贯入临界击数值需要用下式进行修正

$$\bar{N} = \bar{N} [1 + 0.125(d_s - 3) - 0.05(d_w - 2)] \quad (1)$$

式中:  $\bar{N}$  为当  $d_s = 3\text{m}$ ,  $d_w = 2\text{m}$  时,砂土液化标准贯入临界击数。由表1中查出;  $N$  为饱和砂土所处深度  $d_s = 3\text{m}$ ,  $d_w = 2\text{m}$  时的标准贯入临界击数;  $d_s$  为饱和砂土所处深度(m);  $d_w$  为地下水位埋深(m)

判别方法是用(1)式计算的  $N$  值与实测标准贯入击数  $N$  相比较,当  $N < \bar{N}$  时,判为可液化砂土,反之则不液化。

下面对(1)式进行讨论,利用(1)式对处于不同深度的饱和砂土进行验算,以设计地震烈度 VII 度为例,设  $d_w = 2\text{m}$ ,分别以不同的  $d_s$  代入(1)式,计算结果见表2<sup>[1]</sup>。

表2 不同埋藏深度条件下砂土层的值

Table 2 Critical number of standard penetration hammers  $N$  at sandy soil in different depth

$d_s/\text{m}$	$d_w/\text{m}$	$N$	$d_s/\text{m}$	$d_w/\text{m}$	$N$
0	2	3.75	9	2	10.5
3	2	6	13	2	13.5
6	2	8.25			

由表2中可见,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,砂土层上部覆盖层较大时,对液化会产生抑制作用。根据唐山地震砂土液化资料,埋深35m以下的砂土层几乎不产生液化<sup>[1]</sup>。另外还可以看到,当  $d_s = 10\text{m}$ ,  $d_w = 0$ ,地震烈度为 VII 度区时,  $\bar{N}$  值为6,利用(1)式可得  $N = 11.8$  击,也就是说,若该层标贯实测值大于11.8击,砂土层不会液化,从唐山沿海地区多处勘察资料可知,埋深8~10m的砂土层,平均标贯击数在29~34击,按照判别法,它不应该液化,但唐山地震时,沿海地区该层砂土是液化的<sup>[2]</sup>。再比如,当  $d_s = 0$  时,即砂土层位于地表,假设  $d_w = 0$ ,仍以 VII 度区为例,若按(1)式判别,只要实测标贯击数  $N$  值小于3.81击,砂土层就会液化,这显然是不符合实际情况的,因为地表砂土层可以近乎自由排水,所以不会发生液化。由此可见,(1)式的局限性很大,在许多情况下,它是不适用的。

这一方法是以实际资料为基础,用统计学的方法建立起来的经验公式判别法,其存在着下述问题。

第一,不能反映地震强度对液化的确切影响,仅以烈度概括是不够的,应定量化。

第二,不能反映地震持续时间对砂土层液化的影响。

第三,不能反映上覆土层特性对砂土层产生液化与否的作用。

基于上述问题,在实际判别中就难免产生误判,根据唐山地震砂土液化的实际资料结合砂土层的埋藏条件,针对不同烈度分区,对此方法进行检验,结果见表3。

表3 《抗震规范》(TJ11-78)判别成功率

Table 3 Ratio of successful discrimination using ERS Codet(TJ11-8)

烈度	VII	VIII	IX
液化	检验数/个	17	19
	成功率/(%)	58.8	63.2
非液化	检验数/个	16	9
	成功率/(%)	68.75	55.6

从表3中可见,在唐山沿海地区 VII、VIII、IX 三个烈度分区内应用标准贯入临界击数法判别砂土液化的成功率,不论在液化还是非液化点均较低,这是由于该方法对影响砂土液化的一些关键因素未予考虑所造成的。

## 2.2 美国 Seed 判别式

该方法也是我国现行规范中应用比较广泛的一

种判别砂土液化的标准, 是由 Seed 等人1975年首先提出, 后经多次修正而成的, 其所用的判别式是利用室内38个试验资料进行统计分析建立起来的经验公式, 并根据现场砂土液化剪应力比  $\tau/\sigma_0$  和标准贯入阻抗  $N_1$  的临界线来判别液化的可能性(图1)。

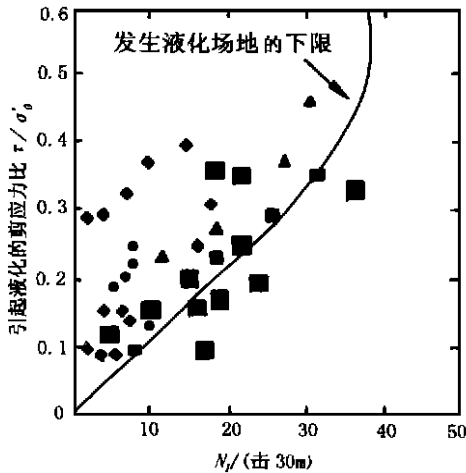


图1  $\tau/\sigma_0$  与  $N_1$  的关系  
Fig. 1 Relation between  $\tau/\sigma_0$  and  $N_1$

标准贯入阻抗  $N_1$  是将不同深度实测的标准贯入击数  $N_{63.5}$  按下式修正为有效覆盖压力近似等于 0.1 MPa 时的击数。

$$N_1 = CN \cdot N_{63.5} \tag{2}$$

$$CN = 1 - 1.25 \lg \frac{\sigma_0}{\sigma_1} \tag{3}$$

式中,  $\sigma_0$  砂土层有效覆盖压力;  $\sigma_1$  近似等于 0.1 MPa

引起液化的地震剪应力比  $\tau/\sigma_0$  按下式确定

$$\frac{\tau}{\sigma_0} = 0.65 \frac{a_{\max}}{g} \frac{\alpha_0}{\sigma_0} \gamma_d \tag{4}$$

式中,  $\frac{a_{\max}}{g}$  地面加速度峰值与重力加速度的比值, 取值见表4,  $\alpha_0$  为砂土层总的上覆压力;  $\gamma_d$  为地震剪应力随深度的衰减系数, 一般可以简化为两条经验线性方程

深度  $d_s < 10$  m 时,  $\gamma_d = 1.0 - 0.01d_s$

深度  $d_s = 10 \sim 20$  m 时,  $\gamma_d = 1.2 - 0.03d_s$

其余符号同前。

由(2)式及(3)式算出的标准贯入阻抗  $N_1$  与计算的地震剪应力比  $\tau/\sigma_0$  按图1进行比较。如果交点落在图中临界线的左侧, 则判为可液化; 落在临界线右侧时判为不液化。

表4 不同烈度区  $a_{\max}/g$  取值

Tab 4  $a_{\max}/g$  value for different seismic intensity areas

设计烈度		VII	VIII	IX
抗震规范 TJ11-78	一般规定	0.1	0.2	0.4
	计算采用	0.075	0.15	0.3
《中国地震烈度表1980》		0.125	0.25	0.5

下面对上述方法进行分析, 首先根据其条件, 这种方法只适用于埋深在20 m 以上的砂土层, 20 m 以下的砂土层不适用。显然, 当  $d_s > 20$  m 时, 无从取值, 如果延用  $\gamma_d = 1.2 - 0.03d_s$ , 则当  $d_s = 40$  m 时,  $\gamma_d = 0$ , 则按 Seed 判别法, 无论标准贯入阻抗  $N_1$  为何值, 只要  $N_1 > 0$ , 砂土层都会发生液化, 显然, 这一结论是错误的。另外, 从(3)式看, 如果  $\sigma_0/\sigma_1 = 6.3$  时,  $CN = 0$ , 则  $N_1 = 0$ , 由  $\sigma_0$  可知, 此时砂土层相应埋深大约在7 m 左右, 按照 Seed 判别法, 不论发生多么微弱的地震(即  $a_{\max}$  不论多么小), 只要  $\tau/\sigma_0 > 0$ , 则砂土层都要液化, 这显然也是错误的。事实上, (3)式将 Seed 判别法限制在埋深7 m 以内的砂土层, 当埋深超过7 m 时, 其  $CN$  值为负, 无法判别。

利用唐山沿海地区砂土液化的资料对 Seed 判别法进行成功率检验结果(表5)可以发现, 它的判别成功率也不是很高。其原因有二, 一是此方法为统计得出的经验判别式, 必然存在一定或然率而产生偏差; 二是此方法所取样本仅为实验室内对38个样本试验所得之结果, 代表性不强。

表5 Seed 判别法成功率

Table 5 Ratio of successful discrimination using Seed's method

烈度		VII	VIII	IX
$a_{\max}/g$		0.1	0.2	0.4
液化	检验数/个	41	91	112
	成功率/(%)	36.6	69.2	75.0
非液化	检验数/个	76	61	79
	成功率/(%)	86.6	52.5	78.5

2.3 静力触探比贯入阻力判别法

铁道部第三设计院和铁道科学研究院(1978)根据海城、唐山两次地震实测的试验资料得出: 当饱和砂土的静力触探比贯入阻力  $P_s$  小于按下式算出的

时,则认为是可液化砂土。

砂土埋深小于10 m 时

$$P_s = P_{s0} [1 - 0.05(d_w - 2)] \quad (5)$$

砂土埋深大于10 m 时

$$P_s = P_{s0} [1 - 0.01(d_w - 10) - 0.05(d_w - 2)] \quad (6)$$

式中,  $P_s$  为饱和砂土埋深  $d_s$ , 地下水位埋深  $d_w$  时, 砂土液化临界比贯入阻力值。

$P_{s0}$  为饱和砂土埋深  $d_s$  小于10 m,  $d_w$  等于2 m 时的液化临界比贯入阻力, 设计烈度为Ⅶ、Ⅷ、Ⅸ度时, 其数值为6、10、16 MPa。

先对(5)式进行讨论, 此式适应于埋深小于10 m 的砂土层, 假设  $d_w = 2$  m, 由(5)式知, 此时  $p_s = p_{s0}$ , 则埋深2~10 m 砂土层的  $p_s$  值为常数, 在Ⅶ度区为6, Ⅷ度区为10, Ⅸ度区为16, 也就是说埋深2 m 的砂土层与埋深10 m 的砂土层, 其液化难易程度是一样的, 只要实测  $p_s < p_s$ , 这显然不合理。另外, 当  $d_s = 10$  m 时, 是用(5)式进行判别还是用(6)式判别不得而知, 但其结果是不一样的, 很可能(5)式判为液化, 而(6)式判为不液化, 产生矛盾。

再来看(6)式, 假设  $d_w = 0$ ,  $d_s = 24$  m 时, 由(6)式  $p_s = 0$ , 这一结果的意义表明当砂土层埋深大于24 m 时, 就一定不会液化, 因为此时实测的比贯入阻力肯定比零大, 即比  $p_s$  大, 也就是说, 不论地震多么强烈, 砂土层的液化深度范围都在24 m 以内, 而从1976年唐山地震的液化资料来看, 极震区(Ⅹ度、Ⅺ度)液化深度在30 m 以上。事实上(6)式是将液化砂土的埋藏条件限制在  $0.01(d_w - 10) + 0.05(d_s - 2) \leq 1$  这样一个范围内。

## 2.4 《抗震设计规范》GBJ 中采用的标准贯入临界击数法

《规范》GBJ11-89将《规范》TJ11-78中的标准贯入临界击数法进行了修正, 修正后判别式为

$$N = \bar{N} [0.9 + 0.1(d_s - d_w)] \sqrt{\frac{3}{P_c}} \quad (7)$$

式中:  $P_c$  为砂土层中粘粒含量; 其他符号同前。

从(7)式来看,  $d_s = d_w$  时, 可以确保砂土层处于饱水状态, 这时仅取决于砂土层中粘粒含量的多少, 而与其他因素无关, 即只要砂土层埋深与地下水位相同, 不论这一埋深多么大, 其液化判别标准是一样的, 这显然与基本理论不符。况且式中  $P_c$  是针对轻亚粘土进行的修改, 目的是能够适用两种土的判别, 而对轻亚粘土的判别目前还不成熟。由此可见,

这种修正只是形式上的, 或说是局部的, 而不是质的变化, 那么, 存在的问题也就不言而喻。

## 2.5 周期抗剪切系数 $F_L$ 判别法

这是日本《道路桥涵规范》中所采用的判别法, 在这一规范中规定, 地下水位处于地面以下10 m 埋深以内, 砂土层为埋深在20 m 以内, 平均粒径  $D_{50}$  在0.02~2.0 mm 之间的饱和砂土层, 在此条件下, 可按下式进行液化判别

$$F_L = \frac{R}{L} \quad (8)$$

$$R = R_1 + R_2 \quad (9)$$

$$L = r_d \cdot k_s \cdot \frac{\sigma_v}{\sigma_v} \quad (10)$$

$$r_d = 1.0 - 0.015z \quad (11)$$

$$k_s = v_1 \cdot v_2 \cdot v_3 \cdot k_{so} \quad (12)$$

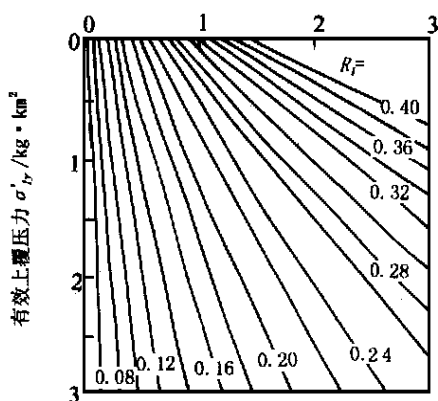
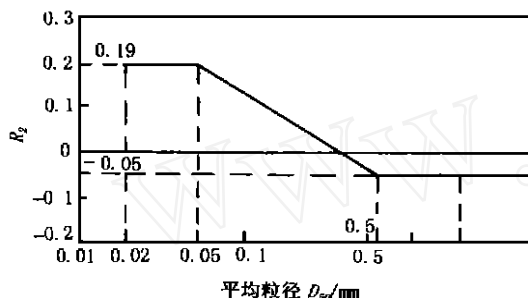
$$\sigma_v = \frac{[\gamma_d \cdot h_w + \gamma_s(z - h_w)]}{10} \quad (13)$$

$$\sigma_v = \frac{[\gamma_d \cdot h_w + \gamma_s(z - h_w)]}{10} \quad (14)$$

式中:  $F_L$  ——周期剪切系数;  $R$  ——周期强度应力比;  $L$  ——周期剪切应力比;  $r_d$  ——周期剪切应力比在深度方向的折减系数;  $k_s$  ——判别液化用的地表水平地震系数;  $\sigma_v$  ——总上覆土压力;  $\sigma_v$  ——有效上覆土压力;  $R_1$  ——用标贯击数  $N$  值和确定的周期强度应力比的第一项(见图2);  $R_2$  ——用平均粒径  $D_{50}$  的函数表示的周期强度应力比的第二项(见图3);  $z$  ——从地表起的深度(m);  $v_1$  ——地震区域系数;  $v_2$  ——地基条件系数;  $v_3$  ——重要性系数;  $k_{so}$  ——用于液化判定的标准设计的水平地震系数(假定——0.15);  $\gamma_d$  ——地下水位以上土的容重( $t \cdot m^{-3}$ );  $\gamma_s$  ——地下水位以下土的容重( $t \cdot m^{-3}$ );  $\gamma$  ——地下水位以下土的有效容重( $t \cdot m^{-3}$ );  $h_w$  ——从地表到地下水位的深度(m);

这种方法是在综合了 Seed 法及标贯法中各因素的基础上提出的, 与其他方法相比较, 这一方法考虑的因素比较全面, 但是过于繁琐, 其中有些系数取值没有明确规定, 随意性很大, 使用时很不方便, 达不到很好的效果。另外在其条件中规定, 地下水位埋深在10 m 以内, 砂土层埋深在20 m 以内等等, 超出此范围者无法判别, 局限性很大。

从上面的分析可以看出, 目前所用的液化判别方法都存在着许多问题, 应当说不是很完善, 就方法的思路来讲, 都是可行的, 但由于对影响砂土液化的因素考虑的不很全面, 因此必然会产生误判。

图2  $N$ 、 $\sigma$  与  $R_1$  的关系Fig. 2 Relationship between  $N$ 、 $\sigma$  与  $R_1$  的关系图3 平均粒径  $D_{50}$  与  $R_2$  的关系Fig. 3 Relationship between  $D_{50}$  and  $R_2$ 

### 3 液化的影响因素分析

如前所述, 目前判别方法产生误判的根源是对液化的影响因素考虑不周所致, 尤其是主要影响因素的缺失。

影响砂土液化的因素应分为两大类, 一类是地震因素或称地震条件, 一类是砂土层自身因素或称埋藏条件。

#### 3.1 地震条件

地震条件是指地震强度(产生的地面加速度峰值)和地震持续时间。

##### 3.1.1 地震强度

前面分析的各种判别方法中对这一因素都考虑

到了, 但除 Seed 法是采用的定量数值外, 其余方法均是将这一因素归于烈度进行考虑, 对于同一烈度区其影响是相同的。事实上同一烈度区内不同地点, 由于场地因素的影响, 其地面产生的震动强度不同, 而不同的震动强度会导致不同的结果, 震动强度大, 砂土层液化的可能性就大, 反之则小。因此, 应将这一因素定量化, 而不是只作定性的考虑<sup>[3]</sup>。

##### 3.1.2 地震持续时间

此因素前面各判别方法均未考虑, 而它对液化的影响是很大的, 地震持续时间长意味着作用在砂土层上的往复加荷次数就多, 内部孔隙水压力聚集的就高, 就越易造成液化, 反之则不易造成液化。因此, 砂土层在一个地震持续时间较短的地震中没有液化, 但在持续时间较长时就可能液化。

#### 3.2 埋藏条件

埋藏条件是指砂土层自身的条件及相邻土层的条件。

##### 3.2.1 上覆土层厚度(埋深)

该因素在各种判别方法中都考虑到了, 而且都是作为主要参数对待的。埋深越大, 砂土层液化所需聚集的孔隙水压力就越高, 即液化的难度越大, 反之则越容易液化, 在各种判别方法中也体现了这种趋势。但对其另一方面却没有体现出来, 就是埋深不能为零, 因为埋深为零意味着砂土层处于地表, 则其表面为自由排水界面, 根本不具备孔隙水压力积累的基本条件, 因此地表砂不可能液化。

##### 3.2.2 上覆土层的透水性

这一点在各种判别方法中均未考虑, 但它是影响液化的另一个主要因素, 如果上覆土层的透水性相比于砂土层来说要强得多, 则地震时涌入砂土层的水便会很快通过上覆土层排出, 不会在砂土层内部积累起液化所需的孔隙水压力, 也就不可能产生液化, 只有上覆土层的透水性比砂土层的小, 涌入砂土层的水才不会很快排出而在砂土层内部聚集, 随着水的不断涌入, 孔隙水压力增高, 导致液化。

##### 3.2.3 砂土的粒径

仅日本桥涵规范中  $F_L$  法将粒径作为了液化的影响因素之一, 其它方法均未涉及。砂土颗粒的大小对液化也是有影响的, 颗粒越粗, 越不易液化, 反之则越易液化, 其原因有二, 一是粗颗粒砂孔隙水压力消散很快, 孔压不易聚集; 二是粗颗粒砂较细颗粒砂更难处于液化时的悬浮状态。

### 3 2 4 砂土初始孔隙比

砂土层初始孔隙比越大,孔隙水压力传递越快,孔压积累也就越快,砂土越易液化,反之则越不易液化。在1938年,Casagrande曾提出过一个方法,即用临界孔隙比判别砂土液化,由于这一指标很难确定,因此,后来出现的方法对这一因素大都未予考虑。

### 3 2 5 固结程度

固结程度主要是针对轻亚粘土而言的,砂土一般认为是松散的,只有其中粘粒含量占有一定比例后,才会产生固结。固结程度高,土颗粒间的连接力就强,若使其液化,就需聚集起更高的孔压以克服这种连接力,也就不易发生液化,反之,固结程度低,则易发生液化。由于目前对轻亚粘土的判别方法不成熟,因此,规范中还没有针对轻亚粘土的判别方法。

## 4 结 语

综上所述,砂土液化的影响因素是非常复杂的,要将这些因素全部考虑到很难,大多数判别方法往往考虑几项因素,甚至连主要因素都考虑不全,加之有些因素对液化影响的程度、方式还不清楚,仍处于试验研究阶段,因此,常常会造成误判。就现行的判别方法而言,经验性强,理论性差。应将试验和理论结合起来,使试验结果能够上升到理论,从理论的高度重新看待这一问题,是今后液化研究的一个方向。

## 参 考 文 献

[1] 王景明 华北地震灾害与对策[M]. 北京:地震出版社,1993

Wang Jingming The Hazard and Countemmeasure of Earthquake in North of China Beijing: Seismic Publishing House, 1993

[2] 李国新 根据唐山地震资料评价砂土液化势[J]. 勘察科学技术 1984, (5): 11~ 15

Li Guoxin Evaluating The Liquefaction Potential Based on Tangshan's Earthquake DataSite Investigation Science and Technology 1984, (5): 11~ 15

[3] Braja M. Das 土动力学原理[M]. 吴世明 顾尧章译 杭州:浙江大学出版社,1984

Braja M. Das The Dynamic Soil translated by Wu Shiming and Gu Yiaozhang The Publishing House of Zhejiang University 1984

[4] 杜兴信等 渭河盆地东南部砂土液化模糊综合评价及洪水影响研究[J]. 工程地质学报, 1998, 6(2): 160~ 165

Du Xingxin, et al, Research on Comprehensive Fuzzy Assessment of Sand Liquefaction and Flood Influence in South-Eastern Weihe Basin, Journal of Engineering Geology 1998, 6(2): 160~ 165

[5] 张荣祥等 建筑场地地震液化危害评价及地基处理[J]. 工程地质学报, 1998, 6(3): 205~ 210

Zhang Rongxiang, et al, Hazard Assessment of Seismic Liquefaction for Construction Sites and Ground Treatment, Journal of Engineering Geology 1998, 6(3): 205~ 210

[6] 张荣祥 剪切波速判别地震液化势的适用性研究[J]. 工程地质学报 1996, 4(1): 53~ 59

Zhang Rongxiang, Study on The Suitability of Seismic Liquefaction Potential Evaluated by Shear Wave Velocity, Journal of Engineering Geology 1996, 4(1): 53~ 59

[7] 顾宝和等 地震液化效应的综合评价[J]. 工程地质学报, 1995, 3(3): 1~ 10

Gu Baohe, et al, Comprehensive Assessment of Seismic Liquefaction Effects, Journal of Engineering Geology 1995, 3(3): 1~ 10

## 本 刊 通 知

值此第六届全国工程地质大会召开之际,《工程地质学报》第二届第二次编委会也将同时举行,特此通知,请第二届编委会委员准时到会。

本刊启