

# 判别水平土层液化势的剪切波速法

石兆吉 (国家地震局工程力学研究所)

我国从1979年就开始了用剪切波速预测轻亚粘土液化势的研究,利用现场勘测获得的剪切波速资料,按经验作图法给出了八度地区的液化判别界线和判别式。自Dobry按应变法原理提出用剪切波速预测砂土液化势以来<sup>[1,2]</sup>,我国也开展了类似的研究工作,提出若干判别方法和判别式。Dobry方法的一个重要缺陷是过于保守,因为是以刚要产生超孔隙水压力作为判别基准的。为克服这一缺陷,笔者等曾以孔压比等于1,即从超孔隙水压力等于周压力作为判别基准,利用现场和室内试验结果也提出了一个更实用的剪切波速预测轻亚粘土液化势的公式(3)。

剪切波速法虽然是新近出现的预测液化势的方法,但它具有一些明显的优点而逐渐被重视和推广。其最大优点是具有一定的理论基础和室内试验依据。Dobry曾推导出土层的剪切波速、地震烈度、剪应变、埋深和刚度之间的基本表达式:

$$V_s = \left( \frac{(a_{\max}/g) g d_o r_d}{\gamma (G/G_{\max})_v} \right)^{1/2} \quad (1)$$

式中  $V_s$ ——剪切波速(米/秒),  $a_{\max}$ ——地表最大加速度(米/秒<sup>2</sup>),  $g$ ——重力加速度(米/秒<sup>2</sup>),  $d_o$ ——埋深(米),  $v$ ——剪应变,  $\gamma_d$ ——考虑土柔性

的系数,  $(G/G_{\max})_v$ ——剪应变为  $v$  时的横量衰减系数。

同时,室内试验结果证明,动荷载下土的孔隙水压力发展主要取决于应变幅值,刚要产生超孔隙水压力时的剪应变称为边缘剪应变,其变化范围约在  $1 \times 10^{-2}\%$  和  $2 \times 10^{-2}\%$  之间。试验结果还证明,影响液化的主要因素对剪切模量(或剪切波速)也有明显影响,例如土密度的增加和周压力的提高等都将提高土的剪切波速值,很明显,它们也同样增强了土的抗液化能力。这就是利用剪切波速预测液化势的物理基础。粘土颗粒对剪切波速值是有明显的影响,对抗液化强度的影响也很大,但影响的方式不一样。粘土颗粒的存在使剪切波速值减小,但却使抗液化能力增加这一特点将使轻亚粘土的液化临界判别值低于砂土的。在用标准贯入击数或静触探作为判别指标时,也存在同样情况。

剪切波速法的另一个优点是判别式中不包含地下水这一项,显得更加简单。地下水位是影响液化的重要因素之一,它的作用相当于周压力的作用,必须加以考虑。在基本表达式(1)中,地下水位只对表示抗液化能力的剪切模量  $G$  和最大剪切模量  $G_{\max}$  值有

表3 地基的物理力学参数

参 数 岩体类型	横向各向同性体		各向同性体		偏差伊 (%)
	弹性波速 (m/s)	按式(4)计算	弹性波速 (m/s)	按式(5)计算	
石英砂岩夹薄层粉砂岩和粘土岩 ( $\rho = 2.58 \text{g/cm}^3$ )	$V_{\perp, \rho} = 2360.5$	$E_{\perp} = 10.52 GP_0$	$V_{\rho} = 3336.9$	$E = 17.42 GP_0$	66
	$V_{\perp, \rho} = 1202.8$	$\nu_{\perp} = 0.17$	$V_{\rho} = 1714.5$	$\nu = 0.36$	112
	$V_{\parallel, \rho} = 4110.9$	$G_{\perp} = 3.81 GP_0$		$G = 7.73 GP_0$	103
	$V_{\parallel, \rho} = 2255.5$	$E_{\parallel} = 39.87 GP_0$			-56
	$V_{45^\circ, \rho} = 3239$	$\nu_{\parallel} = 0.49$			-27
		$G_{\parallel} = 13.38 GP_0$			-42

因素及地基各向异性才是正确的方向。在这一点上人们往往容易忽略地基物理力学属性的研究,必须引起足够的重视。

参加现场试验的有宋大卫、黄理兴、于衍罡等同志,仅此致谢!

## 参 考 文 献

- [1] 王龙甫, 1978年, "弹性理论", 科学出版社。
- [2] Ernest A. Kaarsberg, 1968, Elasticity Studies of isotropic and anisotropic rock Samples, Transactions of the Society of mining engineers of AIME Vol 24 No 4

影响,而且可以近似地认为,对 $G$ 和 $G_{max}$ 有同样程度的影响,因此,模量衰减系数 $(G/G_{max})$ 的采用使地下水水位的影响基本抵消了。另一方面,地下水水位的影响主要反映在实测波速值上。

剪切波速法的第三个优点是测定值稳定、可靠和逐渐被工程界采用。某些现场原位测试结果表明<sup>(3)</sup>,用跨孔法、检层法和稳态振动法测得的剪切波速值在地面下5米到8米范围内基本一致,而常用的跨孔法和检层法之间的测试结果在20米范围内只相差10%左右,这比标准贯入试验的精度要高得多。此外,在场土地分类、土层地震反应等分析中,剪切波速已成为必不可少的指标之一。国内已有日益增多的勘察部门掌握了剪切波速的测试设备和技术,可以预料,剪切波速值将很快成为广泛应用的常规测试指标之一。

利用式(1)建立液化判别式的关键是正确选定临界液化状态时的剪应变 $\gamma_{crit}$ 和模量衰减系数 $(G/G_{max})_{crit}$ ,笔者根据室内试验资料和八度地区的现场资料已确定出轻亚粘土的 $\gamma_{crit} = 2.0\%$ ,  $(G/G_{max})_{crit} = 0.02808$ ,相应的液化判别式为:

$$V_{scrit} = 132 \left[ \frac{a_{max}}{g} (d_s - 0.0133d_s^2) \right]^{1/2} \quad (2)$$

若七、八和九度区的 $a_{max}/g$ 分别取为0.1、0.2和0.4,则判别式为:

$$V_{scrit} = \bar{V}_{scrit} (d_s - 0.0133d_s^2)^{1/2} \quad (3)$$

式中 $\bar{V}_{scrit} = 42$ (七度)、 $60$ (八度)和 $84$ (九度)米/秒。

式(2)和(3)虽然是由八度区现场资料获得的,但也适用于其他烈度区,因为 $\gamma_{crit}$ 和 $(G/G_{max})_{crit}$ 只反映了轻亚粘土的一种抗液化能力,不应随烈度变化,图1中的资料证实了这一点。图中资料取自河北宁河地区\*,1976年唐山地震时宁河属九度烈度区,出现大面积的轻亚粘土液化和喷出现象。按式(3)得到的液化判别界线也示于图中。不难看出,总的成功判别率达到 $17/19 \approx 89\%$ ,证实式(2)和(3)具有相当的可靠程度。

式(2)和(3)只适用于轻亚粘土,因为是根据轻亚粘土资料获得的。若把式(2)和(3)用于砂土,则将获得过于危险的判别结果,把某些可能液化的场地判为不液化,因此,有必要建立适用于砂土液化的判别式。实际上,式(1)也完全适用于砂土,关键也是确定临界液化状态时的剪应变和模量衰减系数,利用现有的资料已经可以做到这一点。

根据国内外大量的室内三轴液化结果可以认为,取2%作为临界液化状态时的剪应变是适宜的,轻亚粘土的现场资料证明了这一点<sup>(4)</sup>,没有理由认为砂土

的临界剪应变会比2%相差许多。若取砂土的 $\gamma_{crit} = 2.0\%$ ,根据砂土的现场资料,由式(1)计算相应的模量衰减系数,在 $(G/G_{max}) \sim d_s$ 图上就可得到液化与未液化分界处的临界模量衰减系数 $(G/G_{max})_{crit}$ ,如图2中所示。图中的砂土现场资料有53个,烈度变化自六度至九度,不液化场地占多数,为46个。从图

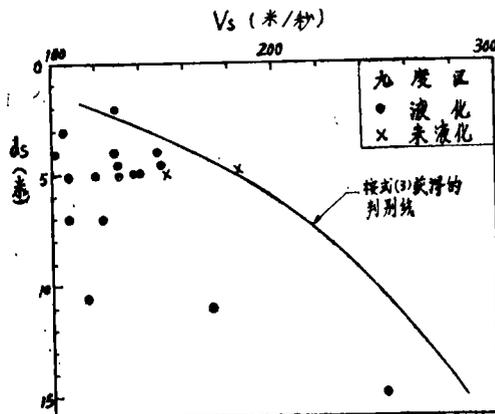


图 1

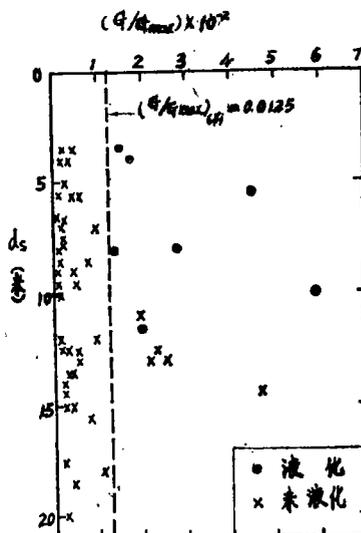


图 2

上可取 $(G/G_{max})_{crit} = 0.0125$ ,此时液化的回判成功率为100%,未液化的为89%,总的回判成功率约为90%。计算中取 $\gamma_d = 1.0 - 0.0133d_s$ ,这样,砂土的判别式为:

$$V_{scrit} = 198 \left[ \frac{a_{max}}{g} (d_s - 0.0133d_s^2) \right]^{1/2} \quad (4)$$

不同烈度时的液化判别式为:

$$V_{scrit} = \bar{V}_{scrit} (d_s - 0.0133d_s^2)^{1/2} \quad (5)$$

式中 $\bar{V}_{scrit} = 63$ (七度)、 $89$ (八度)和 $125$ 米/秒(九度)。

(下转第13页)

\* 由国家地震局工程力学研究所刘曾武提供

续表

前兆特征	点号	地 点	变形体类型	规 模 (万m <sup>3</sup> )	发生时间	前兆发生时间 (h)
滑坡后缘 出现拉裂缝	316	兴山县古夫高头山	降雨塑流型土滑	3.15	1982.7.20	滑前24
	318	兴山县龚家桥双龙山	降雨塑流型土滑	16.5	1982.7.20	滑前24
	324	兴山县蒿坪	降雨塑流型土滑	7.2	1982.7.20	滑前24
	327	远安县沙口公社常家湾	降雨塑流型土滑	7.14	1964.7.	滑前36
	371	长阳县桃山	降雨塑流型土滑	96	1973.9	滑前24
	69	利川县文斗公社锄头溪	降雨塑流型土滑	14.4	1982.7.12	滑前 6
	79	利川县文斗公社龙口	降雨塑流型土滑	7.5	1968.8	滑前36
	58	利川县文斗公社下头坡	降雨塑流型土滑	3.24	1983.7.13	滑前25
	80	利川县文斗公社柑子坪	降雨塑流型土滑	96	1968.8	滑前28
	35	利川县老屋基公社狮子坝	降雨塑流型土滑	0.09	1983.7.13	滑前23
	94	宣恩县雷公顶	降雨塑流型土滑	2.15	1982.5.29	滑前 5
	97	宣恩县椒园公社寨子山	降雨塑流型土滑	0.57	1982.8.4	滑前 7
	127	巴东县火石堰东	降雨塑流型土滑	2.7	1982.6.	滑前 4
	140	巴东县胡家岩	降雨塑流型土滑	6	1980.7.20	滑前 2
	4	利川县忠路公社乐丰	切蚀型土滑	57.5	1983.7.14	滑前12
	41	恩施县龙马公社桐麻园	切蚀型土滑	55	1980.8.23	滑前 2
	389	兴山县城关小河溪	切蚀型土滑	6.6	1982.7.22	滑前24
	404	宜昌县太平溪大水田	切蚀型土滑	0.24	1980.7	滑前 7
	531	当阳县庙前公社冉家河	潜蚀型土滑	1.4	1981.5.15	滑前 3

临前兆很易区别。

引起应有的重视。

近几年来,鄂西山区以边坡变形为主的地质灾害十分突出。据不完全统计,仅1980—1983年鄂西山区共发生重大边坡变形达7000余处,毁坏房舍、农田、桥梁、道路,造成生命财产的重大损失。

1980年6月3日远安县盐池河磷矿发生山崩,造成灾难性事件而轰动全国,近年来,我国西南、西北山区的地质灾害连年地、大范围地出现(仅1983年雨季四川、陕南发生岩崩、滑坡、泥石流等地质灾害达70794处<sup>[4]</sup>)。因此,研究边坡变形的短临前兆,揭示其成因和表征,则可以及时提供预报信息,有着广泛的应用价值和现实意义。本文旨在抛砖引玉,以期

(上接第10页)

很明显,砂土的液化判别式与轻亚粘土的具有同样形式,只是系数不同而已。

根据上述分析可以得出结论,1.用剪切波速法预测土层液化势的最大优点是具有一定的理论基础和室内试验依据,判别式简单和便于使用,剪切波速值又是一个易于现场测定的稳定而可靠的土动力参数。2.现场资料证明,轻亚粘土液化判别式(2)和(3)有相当的可靠性,可应用于不同的烈度区,成功判别率在80%以上。3.砂土液化判别式(4)和(5)的建立有一定的理论基础和现场资料依据,应该是比较可靠的,但今后还应进一步加以验证。

### 参 考 文 献

- [1] 耿乃光等,1980,应力途径和破裂前兆,地震学报,2卷3期。
- [2] 陈颀,1981,不同应力途径三轴压缩下岩石的声发射,地震学报,3卷1期。
- [3] 蒋锦昌,1980,动物的行为异常是一种临震前兆,地震学报,2卷3期。
- [4] 蒋锦昌等,1981,震前地声与动物异常关系的研究,地震学报,3卷1期。
- [5] 张倬元,1985,工程动力地质作用的研究进展,工程勘察,1.1985。

### 参 考 文 献

- [1] Dobry,R, et al, Liquefaction Potential of Saturated Sand—The Stiffness Method, Proc. Seventh World Conference on Earthquake Engineering, Istanbul, Turkey, September, Vol.3.
- [2] Dobry,R, et al, 1981, Liquefaction Susceptibility from S—Wave Velocity, Instity Testing to Evaluate Liquefaction Susceptibility, ASCE, Preprint 81—544, October.
- [4] 石兆吉,王承春,1984,预测轻亚粘土液化势的剪切波速法,全国地震工程会议论文集。
- [3] 张守华,1984,用原位和室内试验方法测定饱和和粘性土的动力性状,全国地震工程会议论文集。