

二滩围堰地基土液化的试验研究*

何昌荣

王建洪

(成都科技大学水电学院) (水电部成都勘测设计院)

一、前言

海城(1975)、唐山(1976)地震调查中,发现大量粉质壤土或轻亚粘土产生了液化破坏,现场和室内的很多试验研究^{[1][2]}结果说明随粘粒(<0.005 毫米)含量增加,液化的可能性也随之降低,粘粒含量超过12%时发生液化破坏的很少。

二滩水利枢纽工程的地震烈度为7度,按8度设防。上下游围堰地基的第一层属块石夹砂卵石,饱和容重 $\gamma_m=2.1$ 克/厘米³;第二层为砂砾卵石夹砂,饱和容重 $\gamma_m=2.18$ 克/厘米³,有的地方没有第二层,即第一层的下面就是此次试验的粉质粘土。该层土离地面最浅的约9.65米,最深约30米,需论证在8度地震情况下的液化势。

一次地震只有一个地震震级,但可以产生多个地震烈度,即使在某一场地的最大地震加速度相同,但也可能由于地震震级的不同而产生不同的破坏结果。例如震级高的将可能以其巨大的能量,较长时间地持续出现等于和接近于最大地震加速度,使建筑物遭到破坏;相反,震级低的也出现了相同的最大地震加速度,但可能因其次数太少或振动历时太短而使建筑物不致破坏。显然,只考虑最大地震加速度而不考虑地震震级或振动历时是有缺点的,如拟静力法。

地震波是振幅和频率都不断变化的随机波。在最大振幅出现的瞬时或短时间内,坝坡的稳定安全系数可能小于1,但因其历时太短,不足以产生较大变形或导致坝坡破坏。稍后振幅迅速减小甚至反向,即增加坝坡稳定性。

本文对场地液化势的评价,在剪应力对比法中只对水平场地、即未修围堰前的地基作了评价,但试验的其它结果可用于有了围堰以后的分析。以颗粒、流塑限和粘粒含量等为主要指标进行的分析,则具有普遍意义。

二、试样物理性质及试验概况**

试样颗粒曲线见图1,部分物性指标见表1。颗粒试验分散剂为氨水,全部试验均按《土工试验操作规程》(上册)进行。根据备样时判断和固结完成(孔隙水压力 $u=0$)时间大于8小时的归于粉质粘土,代表曲线为图1中 c_1 曲线。固结完成时间为2小时左右的归于重粉质壤土,代表曲线为图1中 c_2 曲线。若以卡氏(A. Casa-grande)塑性图定名都属于中压缩性粘土cI。每种土按固结主应力比 $K_c=\frac{\sigma_{10}}{\sigma_{30}}=1, 1.5, 2$ 各

*参加试验的还有张玉琼同志。

**试样颗粒曲线由成都勘测设计院科研所土壤组试验提供。

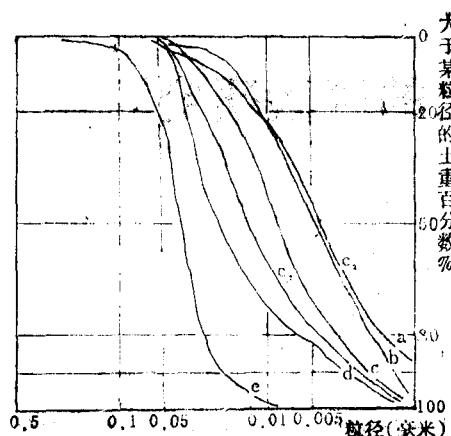


图1 试样颗粒曲线

表1 颗粒组成及物性指标

钻孔号	0.1~0.05 (毫米) %	0.05~0.005 (毫米) %	<0.005 (毫米) %	比重 G	流限 W%	塑性指数 Ip	塑性图分类	三角图分类
13-1	4	46	50	2.72	35	14.5	c I	粉质粘土 a
9-1-3	2	47.5	50.5	2.72	40	15.6	c I	粉质粘土 b
13-6	1	70	29	2.69	32.5	13.5	c I	重粉质壤土 c
9-1-10	2	80.8	17.2	2.70	29	10	c I	粉土 d
13-	27	73	0	2.69	29	9.8	c I	轻粉质砂壤土 e

表2 物性指标及试验条件

土类		重粉质壤土			粉质粘土		
试验编组		III	IV	V	I	VI	VII
固结比 $K_c = \sigma_{10}/\sigma_{30}$		1	1.5	2	1	1.5	2
固结侧压力 σ_{30}		2	1.33	1	2	1.33	1
含水量 W%	天然制样	27.2 29	26.4 32.7	30.3 31.5	26.8 27.6	30.1 30.8	30 32.6
饱和度 Sr%	天然制样	0.96 1	0.93 1	0.97 1	0.98 1	1.0 1	0.96 1
容重 克/厘米 ³	天然 干 制样	1.92 1.51 1.95	1.69 1.47 1.95	1.90 1.46 1.92	1.98 1.56 1.99	1.95 1.50 1.96	1.92 1.48 1.97
液性指数 I _c		0.61	0.70	0.84	0.41	0.66	0.81
取土深度 (米)		26.1	27.7	24.3	25.2	23.5	23.5

三、试验结果及分析

试验结果主要以 $\frac{\tau_0}{\sigma_{30}} - \log N$ 关系曲线和 $\frac{\Delta u}{\sigma_{30}} - \frac{\Delta \tau}{\sigma_{f_u}}$ 关系曲线表示，见图2、图3、图4和表3。从这些图上选取某一破坏标准的曲线可整理成其它各种表达形式，如图5。

和表 4 是选取轴向应变 $\varepsilon = 5\%$ 为破坏标准整理的。图中各种符号的意义见图 6，静有效内摩擦角 $\varphi' = 33^\circ$ 。 $\Delta\sigma_1$ 为作用在试样上的振动应力幅， σ_{f0} 、 τ_{f0} 分别为试样开始破坏面上的振前起始法向压力和起始剪应力， $\Delta\tau$ 为振动剪应力。

图 2 中重粉质壤土试验点的规律性较好，离散小，曲线形状符合一般规律。图 3、图 4 中曲线的点子受粘粒含量、含水量、试样均匀程度等的变化影响较大，点子较离散。图中曲线可见其趋势。

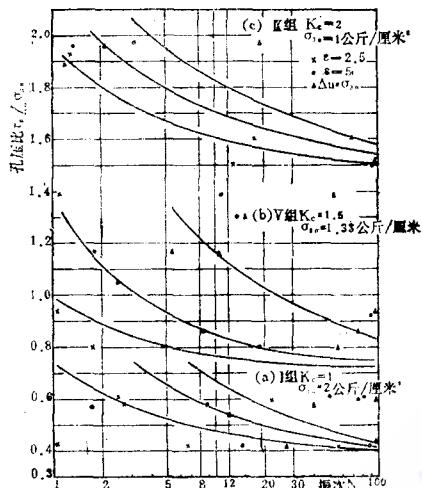


图 2 重粉质壤土 τ_0/σ_{30} - $\lg N$ 关系曲线

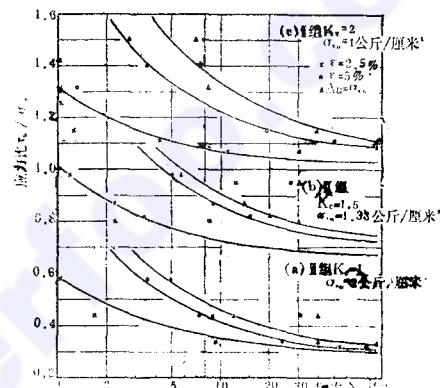


图 3 粉质粘土 τ_0/σ_{30} - $\lg N$ 关系曲线

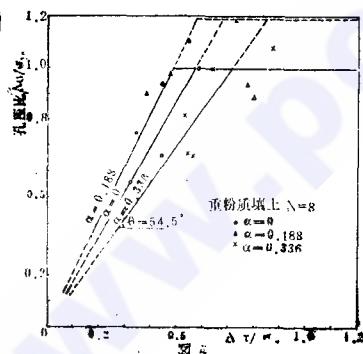


图 4

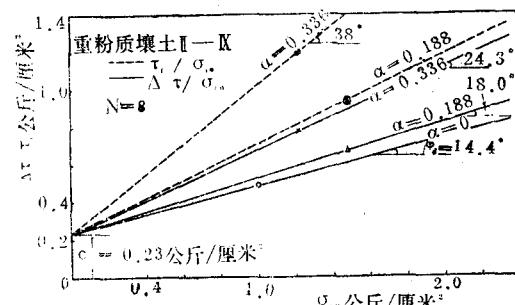


图 5

表 3 $(\frac{\Delta\mu}{\sigma_{30}}) - (\frac{\Delta\tau}{\sigma_{f0}})$ 关系曲线的 θ 值

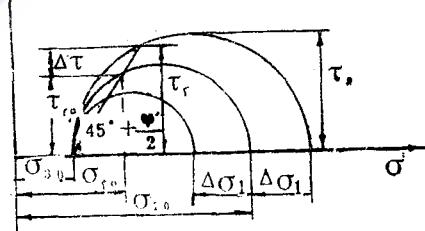


图 6

α 土类 振次	重粉质壤土			粉质粘土		
	0	0.181	0.336	0	0.177	0.36
8	59.5	64	54.5	52	54.5	47.2
12	61	66	54.8	55	58.6	47.7
20	65.5	67	56.3	57	60.7	50.2
30	66	68.6	58	58	62	51

一般砂性土的相对密度 $D_r < 0.55$ 时，轴向应变以 $\epsilon = 2.5\%$ 发展， $\epsilon = 10\%$ 或初始液化 $\Delta u = \sigma_{30}$ 只需很少振次，在图上难以将两条曲线分开。随 D_r 增加，各破坏标准的曲线逐渐拉开。从图 2、图 3 中的曲线可见，振次 $N = 30$ 次时轴向应变 $\epsilon = 2.5\%$ 的动应力比 $\frac{\tau_0}{\sigma_{30}}$ 与初始液化的相比较，低 15%， $N = 8$ 次时可达 40% 以上，表现出类似于紧密砂的特征。

根据以 $\alpha = \frac{\tau_{f0}}{\sigma_{f0}}$ 为参数， $\Delta\tau - \sigma_{f0}$ 大致呈直线关系的结果⁽⁴⁾，假定动凝聚力 c_d 与静凝聚 c' 相等，得到图 5 中直线和表 4 中的结果。

粘性土的凝聚力 c 和有效内摩擦角 φ' 随剪切速率增加而增加，砂性土则增加甚微。所以，假定 $c_d = c'$ 是偏于安全的，表 4 中许多 φ_d 角大于静有效内摩擦角 $\varphi' = 33^\circ$ 也是合理的。

表 4 $\Delta\tau - \sigma_{f0}$ 和 $\tau_f - \sigma_{f0}$ 关系曲线的 φ_d 角

α	重粉质壤土 $c' = 0.23$ 公斤/厘米 ²				粉质粘土 $c' = 0.35$ 公斤/厘米 ²			
	$\Delta\tau - \sigma_{f0}$	$\tau_f - \sigma_{f0}$	$\Delta\tau - \sigma_{f0}$	$\tau_f - \sigma_{f0}$	$\Delta\tau - \sigma_{f0}$	$\tau_f - \sigma_{f0}$	$\Delta\tau - \sigma_{f0}$	$\tau_f - \sigma_{f0}$
0	0	0.188	0.336	0.188	0.336	0	0.177	0.36
8	14.4	18.1	24.3	25.5	38	9.9	24	26
12	13.1	15.4	22.5	22.3	36.5	9.2	22.4	24
20	11.9	13.2	19.4	23.5	34.5	8.8	20.8	22.8
30	10.9	11.5	17.6	21.8	33.7	7.8	19	21.5

图 5 中 $\alpha = 0$ ($K_c = 1$) 时的动抗剪强度 $\Delta\tau$ (或 τ_f) 已乘上折减系数 C_r ⁽⁴⁾，因此，各种条件的动抗剪强度可用下式表示

$$\Delta\tau \text{ (或 } \tau_f) = c' + \sigma_{f0} \operatorname{tg} \varphi_d \quad (1)$$

对重粉质壤土和粉质粘土， $c' = 0.23$ 公斤/厘米² 和 0.35 公斤/厘米²； σ_{f0} 在 $\alpha = 0$ 时为上覆有效压力； $\alpha \neq 0$ 时为假定破坏面上的初始有效压力。

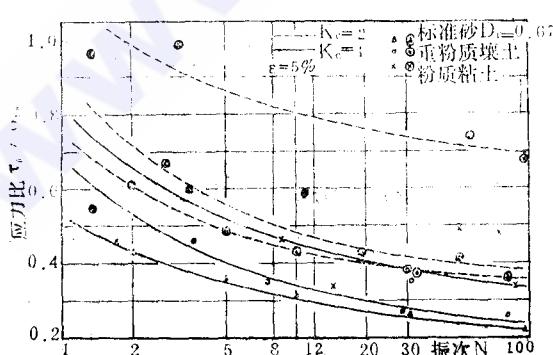


图 7 三种土的比较

1 中的 ϵ 曲线向左移至平均粒径 $D_{50} = 0.07$ 毫米时，又将是最容易液化的土，地质勘探时应注意。

将以上两种土与福建标准砂振动液化第二次对比试验的平均值比较（见图 7）。标准砂的相对密度 $D_r = 0.67$ ，一般认为在 7 度地震情况下不容易液化。考虑到重粉质壤土的相应曲线都高于标准砂，因此略可满足 8 度地震要求。

图 7 中可见，粉质粘土的相应曲线还高于重粉质壤土，表明动应力比随粘粒含量增加而增加。反之，若图

四、场地液化可能性的评价

(一) 剪应力对比简化法^[4] 将地震作用下场地产生的剪应力 τ_{av} 与室内试验法结果 τ_L 比较, 若 $\tau_{av} > \tau_L$, 判为液化, 反之可能不液化。

若场地是水平的或假定破坏面上的初始剪应力 $\tau_{i0}=0$ 时, τ_{av} 和 τ_L 的计算式如下:

$$\tau_{av} = 0.65 \frac{\Sigma \gamma H}{g} a_{max} \cdot \gamma_d \quad (2)$$

$\Sigma \gamma H$ 为计算点以上的总应力, g 为重力加速度, a_{max} 为地面的地震最大加速度, 7 度取 $0.1g$, 8 度取 $0.2g$, 9 度取 $0.4g$, γ_d 为修正系数, 在地面为 1, 随深度增加而减小。

$$\tau_c = \left(\frac{\tau_0}{\sigma_{30}} \right)_N C_v \Sigma \gamma' H \quad (3)$$

$\left(\frac{\tau_0}{\sigma_{30}} \right)_N$ 在图 2 中查取, 地震震级为 5.5~6、6.5、7、7.5、8 级时在液化曲线 $\frac{\tau_0}{\sigma_{30}} - \log N$ 上分别取 $N=5, 8, 12, 20, 30$ 次对应的 $\frac{\tau_0}{\sigma_{30}}$, C_v 为校正系数, 用于从室内三轴液化试验来推求现场液化应力条件, C_v 随 N 增加而减小, $N=5, 12$ 次时 C_v 分别取 0.585 和 0.58, $\Sigma \gamma' H$ 为计算点以上有效压力, 计算结果见表 5.

假定 1 在场地附近发生了一次低震级地震 (如 5.5~6 级), 由于震中离场地较近, 因而产生了较高的地震烈度 (如 8 度), 则可将表 5 中序号为 5 的 τ_{av} 与序号为 6, 7

表 5 τ_{av} 和 τ_L 计算结果表

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	深度 H(米)	$\Sigma \gamma_m H$ (公斤/ 厘米 ²)	$\Sigma \gamma' H$ (公斤/ 厘米 ²)	地震剪应力 τ_{av} (公斤/厘米 ²)		震级 5.5~6 级 τ_L (公斤/厘米 ²)		震级 8 级 τ_L (公斤/厘米 ²)	
				7 度	8 度	$\epsilon = 2.5\%$	$\Delta u = \sigma_{30}$	$\epsilon = 2.5\%$	$\Delta u = \sigma_{30}$
块石夹砂层 (饱和容重 $\gamma_m = 2.1$ 克/厘米 ³)	7	1.47	0.77	0.09	0.183	0.175	0.26	0.13	0.16
	10	2.1	1.1	0.13	0.25	0.25	0.37	0.19	0.22
	13	2.73	1.43	0.15	0.30	0.32	0.49	0.24	0.29
砂砾石夹砂层 (饱和容重 $\gamma_m = 2.18$ 克/厘米 ³)	15	3.17	1.67	0.16	0.33	0.38	0.57	0.28	0.34
	18	3.82	2.02	0.167	0.334	0.46	0.69	0.34	0.41
	20	4.26	2.26	0.17	0.34	0.51	0.77	0.38	0.46

的 τ_L 相比较, 表明在深度 5~10 米范围由可能产生 2.5%~5% 的变形外, 不容易液化。由于该层土下埋最浅的为 9.65 米, 因此认为在 10 米附近可能产生约 2.5% 的变形外, 将不会液化。

假定 2 离场地较远处发生了一次高震级地震 (如 8 级), 由于震中离场地较远, 因而产生了较低的烈度 (如 7 度), 则可将序号为 4 的 τ_{av} 与序号为 8、9 的 τ_L 相比较, 表明不仅不易液化, 变形也将小于 2.5%。

(二) 经验法 以地震现场资料为依据, 分别对各因素的影响进行了分析, 得出

一些供实际参考使用经验关系式、图表。将孔 13 的数据与唐山地震中天津某地区的现场调查资料^[2]比较(见表 6)。表中液化区样品 80 多个, 非

表 6 天津、二滩两地区的土性比较

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	埋深 (米)	地下水 水位 (米)	有效上覆 压力 (公斤/厘米 ²)	>0.05 毫米 (%)	0.05~ 0.005 毫米 (%)	<0.005 毫米 (%)	平均粒径 D_{50} (毫米)	天然 含水量 (%)	干容重 (克/厘米 ³)	液限 (%)	塑性 指数	液性 指数
液化区	2.81.19	0.33	81.35	14.5	4.15	0.073	25.6	1.54	25.6	6.7	0.99	
天津非液化区	2.90.30	0.31	60.9	29.7	9.4	0.054	27.4	1.53	27.6	9.2	0.98	
二滩粉质壤土	2.20	2.43	1.5	76.5	22	0.014	22.6	1.48	32.5	13.5	0.71	
二滩粉质粘土	2.60	2.83	4	46	50	0.015	29	1.51	35	14.5	0.59	

液化区粘粒含量平均值为 9.4%, 塑性指数平均值 9.2, 所以, 当粘粒含量大于 12%, 塑性指数 I_p 大于 7 时, 一般情况下不考虑液化问题是较合理的。当然灵敏粘土应当例外。

表 6 中对液化影响较大的 1、3、5、6、7、11 项都超过非液化区的相应数据较多, 也可认为该场地不易液化。

再将试样的各项指标绘入参考文献〔5〕的几个图中, 都可发现, 这些点都处于非液化区或液化区的边缘地带, 也说明场地不易液化。

五、结 论

试验结果和分析比较表明, 二滩围堰地基土的抗液化强度较高, 不容易液化, 一般能满足 8 度地震要求。当粘粒含量大于 12%, 塑性指数 I_p 大于 7 时, 一般情况下可不考虑液化问题。

参 考 文 献

- 〔1〕钟龙辉: 轻亚粘土地震液化判定方法的分析, 岩土工程学报, Vol. 2, No. 4, 1980
- 〔2〕石兆吉等: 饱和轻亚粘土地基液化可能性判别, 地震工程与工程振动, 4 卷 3 期, 1984
- 〔3〕华东水利学院: 土工原理与计算, 下册, 水利出版社, 1981
- 〔4〕H. B. Seed, et. al: A Simplified Procedure for Evaluating Soil Liqufaction Potential, Geotechnical of ASCE, Vol. 97, No. SM9, 1971 年 9 月
- 〔5〕汪闻韶: 土液化特性中的几点发现, 岩土工程学报, Vol. 2, No. 4, 1980