

小浪底大坝坝基抗震液化问题研究

葛 勇,侯清波,李诗芳

(黄河水利委员会勘测规划设计研究院,河南 郑州 450003)

摘要:对小浪底大坝坝基覆盖层地震液化可能性及其对大坝的影响进行研究.结果表明,河床覆盖层中表层堆积的粉细砂、壤土及砂砾石层顶部的一部分为第四纪全新统沉积物,密实度低,属于液化土;上更新统砂卵石层的含砂率一般小于30%,相对密度大于0.65,地震时不易产生液化,但也有局部含砂率大于30%,只是其分布范围小,不会对坝体造成危害;坝基类砂层为非液化土.

关键词:坝基;覆盖层;地震液化;土石坝;小浪底水利枢纽工程

中图分类号:TV64;TU435

文献标识码:B

文章编号:1006-7647(2001)07-0020-03

小浪底大坝为土石坝,高154m,库容126.5亿 m^3 ,坝基覆盖层厚一般为30~40m,最深达80m.场地地震基本烈度为7度,显然,坝基的抗震问题是该工程的重要工程地质问题之一.因此,需要对坝基覆盖层地震液化可能性及对大坝的影响进行必要的研究.

1 坝基覆盖层工程地质特征

河床覆盖层是上更新统(Q_3)以来形成的,除河床冲积砂砾石层、砂层外,还分布有坡积层、沟口洪积层以及冲-洪积交互层.上更新统(Q_3)与全新统(Q_4)堆积物的分界高程大致为130m,河槽部位受洪水期揭底影响,可降至125m左右, Q_3 堆积物经受过土和砂砾石荷重长期压密作用.

在坝基部位自上而下依次为表砂层、上部砂卵石层及其夹砂层、底砂层、底部砂砾石层.表砂层厚3~7m,层底高程130~135m,属第四系全新统沉积

物,为疏松~中密砂层.上部砂卵石层,顶面高程125~138m,厚度30~45m.夹砂层分布在上部砂卵石层中间,分布高程120m左右,厚度一般为1.0~10.0m.大坝直接座落在上更新世形成的上部砂砾石层上.其中卵石层的含砂率大部分在30%左右,但也有少部分达40%以上,表砂层、夹砂层和底砂层的液化问题较突出,其颗粒级配见表1.

夹砂层的干容重一般在15.65~16.5 kN/m^3 ,平均为16.3 kN/m^3 ,最大值18.7 kN/m^3 ,最小值15.1 kN/m^3 ,相对密度平均为0.68.底砂层的干容重平均16.9 kN/m^3 ,最大值在18.8~18.9 kN/m^3 之间,最小值在14.8~15.2 kN/m^3 之间,相对密度平均0.75.

底砂层的12次标贯试验中有9次未到0.3m深已达50击;夹砂层的14次试验中有7次未到0.3m深已达50次,说明夹砂层、底砂层均属紧密、极紧密的土层.根据 $N_1 = N + (3.3 \sim 3.4)\sigma_v$,修正为标准贯

表1 夹砂层、底砂层颗粒级配统计

岩 性	颗粒级配/%								不均匀系数 U_u
	10~5mm	5~2mm	2~0.5mm	0.5~0.25mm	0.25~0.1mm	0.1~0.05mm	0.05~0.005mm	<0.005mm	d_{50}
中轻壤土			1	4	32	26	21	16	
砂壤土					2	41	51	6	
粉 砂			3	15	34	28	14	6	0.052
细 砂			13	26	40	16	3	2	0.082
中 砂			10	48	29	6	4	3	0.115
砂壤土			4	10	32	23	25	6	0.12
粉 砂				5	38	39	12	6	0.114
细 砂			0.5	14	70	7	2	1	0.154
中 砂	2	4	29	32	24	5	3	1	0.36
粗砂砾 质粗砂	2	10	49	18	16	4	2		0.65

作者简介:葛勇(1966—),男,山东曹县人,主要从事工程地质勘察工作.

入击数,式中 N_1 、 N 、 σ_c 分别为标准贯入击数、实际的贯入击数、贯入深度处的上覆有效压力(单位为 0.1 MPa)。

2 覆盖层抗震液化判别

河床覆盖层中表砂层不仅属液化土,且沉降的问题也较突出,故全部清除。底砂层及底部砂砾石层,分布高程在 110m 以下,上覆有 20m 以上的砂砾石层,只要上覆砂砾石层不液化,就无液化可能。因此,坝基覆盖层液化评价的重点是上部砂砾石层及夹砂层。

2.1 上部砂卵石层

据绝对年龄鉴定,顶部之外系晚更新世沉积物,属非液化地层。顶部属全新世沉积层,当含砂率高于 30% 时,存在液化的可能性。用动剪应变幅法对其液化可能性进行判别如下:

根据试验获得的砂卵石层的动力参数,采用式 (1) 计算砂砾石层的动剪变幅。

$$r_e = 0.65 \frac{\alpha_{max}}{g} \frac{\delta_H}{G_{max}(G/G_{max})} R_Q \quad (1)$$

式中: G 为动剪切模量, kg/cm^2 ; g 为重力加速度, m/s^2 ; δ_H 为深度 H 处水平面上竖向土柱压力, kg/cm^2 ; α_{max} 为地面最大水平加速度, m/s^2 ; R_Q 为折减系数,由表 2 确定; G/G_{max} 取 0.75。

表 2 折减系数

深度/m	R_Q	深度/m	R_Q	深度/m	R_Q	深度/m	R_Q
2	0.98	10	0.91	18	0.68	30	0.1
4	0.97	12	0.87	21	0.61		
6	0.96	14	0.83	24	0.56		
8	0.93	15	0.78	27	0.53		

按地面最大水平加速度 $0.215 \times 9.81 \text{ m/s}^2$,天然地基在无盖重条件下计算的 r_e 如表 3 所示,由表 3 可见,除表部砂砾石层外,一般不易于液化。

2.2 夹砂层

影响夹砂层液化的因素主要是相对密度、粒径、级配、埋藏条件、成因及时代等,下面用两种方法判别夹砂层是否产生液化。

a. 相对密度判别法,砂土液化的必要条件是结构疏松的饱和的砂土,表征砂土密实程度的指标是相对密度(D_r)。一般认为,砂土的相对密度越大,液化

所需的震动频率越快,振动幅度越大。小浪底夹砂层的相对密度大于 0.70(中砂 0.68),大部分在 0.80 以上,属密实至极密实状态。根据 GB50287-99《水利水电工程地质勘察规范》,当设计烈度为 8 时, $D_r > 0.75$ 就不产生液化。由此认为小浪底夹砂层为非液化层。

b. 标准贯入击数判别法。我国 GBJ11-89《建筑设计抗震规范》中利用标准贯入锤击数,判别地表下 15m 范围内饱和砂土地表液化可能性,夹砂层的标准贯入试验成果如表 4 所示。

表 4 夹砂层标准贯入试验成果

孔深/m	岩性	锤击数	临界击数 N_{cr}	贯入深度 /m	$N_{63.5}$
12.61~2.85	粉细砂	50	23	0.24	>62
13.97~4.22	粉细砂	50	24	0.25	>60
15.27~5.47	粉细砂	50	26	0.30	>66
17.40~7.70	细砂	30	29	0.30	>30

一般认为, $N_{63.5} < N_{cr}$ 时,砂层可能液化,否则不液化。小浪底夹砂层的 $N_{63.5}$ 大于 N_{cr} ,由此认为夹砂层为非液化层。

3 坝基覆盖层抗震液化试验及有限元分析

动力分析主要研究的问题是土石坝坝基砂层、砂卵石层液化的可能性和液化对坝的地震稳定性影响,验证抗震措施的合理性。

a. 地震动工程参数。根据小浪底坝址附近地质构造和历史发震情况,对设计地震动工程参数等进行了多次研究,结果见表 5。

表 5 地震动工程参数

提出单位	远震或近震	最大加速度 $a/(9.81 \text{ m/s}^2)$	卓越周期 T/s	地震运动历时 t/s
中国科学院	远震	0.05	0.7	35
工程力学所	近震	0.20	0.3	25
中联联合设计		0.25	0.4	20
河南、江苏地震局与国家地震局工程力学所	远震	0.215		38
	近震	0.215		15
世界银行	远震	0.16		34
咨询专家	近震	0.25		19
L.M. Idriss	水库诱发地震	0.50		15

注:除河南地震局等单位所提地震动参数为坝基覆盖层表面的以外,其他各家所提均为基岩地震动参数。

b. 动力试验研究,试验用的仪器有电磁式三轴

表 3 动剪应变幅计算结果

地层岩性	孔深/m	标高/m	地质时代	横波速度 $v/(\text{m/s})$	动剪应变幅 $r_e/\%$	液化可能性
含砾砂层	4.86~7.8	137.95~134.0	Q_4	215	0.015~0.027	可能
	14.62~16.61	127.72~125.73	Q_3	314	0.004~0.005	不可能
中上部砂砾石层	9.8~22.5	132.77~119.84	Q_3	412~698	0.004~0.008	不可能
	18~19.96	124.04~122.38		392~451	0.011~0.0115	

仪、共振三轴仪、大型电液伺服粗粒土三轴试验机。基本动力特性试验包括：各种土的动应力比值及与破坏振次 N 的关系；动强度指标；阻尼比 λ 、模量 G 与动剪应变 γ 的关系。夹砂层和砂砾石试样的干容重分别为 16.2 kN/m^3 和 18.41 kN/m^3 ，试验成果如表 6 和表 7 所示。

表 6 各种土破坏标准为 2.5%, 5% 的动应力比值

土的类别	固结比 K_c	固结压力 δ_c	应力比值 ($N_L = 30$ 次)	
			2.5%	5%
夹砂层	1	1	0.305	0.303
	1	2	0.258	0.256
	1.5	1	0.388	0.398
	1.5	2	0.335	0.352
	2	1	0.437	0.479
	2	2	0.370	0.420
砂砾石	1	6	0.210	0.218
	1.5	8	0.298	0.320
	2.0	12	0.458	0.480

表 7 各种土的动剪、总剪强度指标

土层名称	初始剪应力比 σ	总剪强度指标, 30 次				动剪强度指标, 30 次			
		2.5%		5%		2.5%		5%	
		c_d	φ_d	c_d	φ_d	c_d	φ_d	c_d	φ_d
夹砂层	0	0.04	7.10	0.04	7.0	0.04	7.1	0.04	7.0
	0.188	0.10	20.9	0.09	21.8	0.16	8.5	0.12	10.9
	0.347	0.14	27.7	0.104	30.0	0.2	8.6	0.19	11.0
砂砾石	0	0	6.5	0	6.7	0	6.5	0	6.7
	0.184	0	22.1	0	22.5	0	12.5	0	12.9
	0.338	0	32.7	0	33.3	0	16.8	0	17.6

由表可见，动应力比值和动剪强度随固结比增加而增大，是符合一般规律的；砂砾石的动应力比值最小，其原因是试验固结压力较大，且含砂量高达

47%。

c. 动力有限元分析。先后共进行了多次动力有限元分析，包括总应力法和有效应力法，大部分采用二维平面分析，最终选用了由世行咨询专家审查的黄委会水科院计算的有效应力地震反应分析，计算中考虑了孔隙水压力的消散和重分布。主要地震参数采用 10^{-4} 超越概率作为坝址地震危险性评定准则，确立了坝址场地地面峰值加速度为 $0.215 \times 9.81 \text{ m/s}^2$ ，设计中采用了远震、近震和近坝的水库诱发地震，主要参数为：①远震，震级 $M = 8.0$ ，震源距 $\Delta = 90 \text{ km}$ ，基岩加速度峰值 $\alpha_{\max} = 0.16 \times 9.81 \text{ m/s}^2$ ；②近震，震级 $M = 7.0$ ，震源距 $\Delta = 29 \text{ km}$ ，基岩加速度峰值 $\alpha_{\max} = 0.25 \times 9.81 \text{ m/s}^2$ ；③诱发地震，震级 $M = 6.25$ ，震源距 $\Delta = 10 \text{ km}$ ，基岩加速度峰值 $\alpha_{\max} = 0.5 \times 9.81 \text{ m/s}^2$ 。

4 结 语

河床覆盖层中表层堆积的粉细砂、壤土及砂砾石层顶部的一部分，为第四纪全新统沉积物，密实度低，属于液化土。Q₃ 砂卵石层的含砂率一般小于 30%，相对密度大于 0.65，地震时不易产生液化。局部含砂率大于 30%，但分布范围小，不会对坝体造成危害。小浪底夹砂层的 $N_{63.5}$ 均大于 N_{cr} ，由此认为夹砂层为非液化土。动力计算分析表明，在上、下游坝角附近及以外，当含砂量较高时，坝基砂卵石层有不同程度的液化现象，但不影响坝的安全。

(收稿日期: 2001-08-14 编辑: 马敏峰)

(上接第 12 页) 分别代入式 (4) 计算得到隶属度 $f(I_L, e)$ 值如表 2 所列。表中粗线表示分类界线，左上方为一般土 (非软土)，右下方为淤泥，中间为淤泥质土等软土。根据土试样的 I_L 和 e 值代入式 (4) 计算得到隶属度 $f(I_L, e)$ 值，然后对照分类规定或直接查表 2 即可得到相应的土类。

实际上，还可以用压缩系数、抗剪强度、比贯入阻力、无侧限抗压强度等指标通过隶属度计算分析得到软土分类，这些常受到勘察手段等因素限制。

4 结 语

采用模糊数学中隶属概念来划分软土，可以将两个以上的土性指标归纳到隶属度中去，这样比较合理、统一，实际应用中容易掌握。同时，由于隶属度本身反映了土的软弱强度，故隶属度亦可作为衡量软土的软弱程度的指标。划分界限的确定应考虑到

传统习惯。

参考文献:

[1] 何广纳. 土工的若干新理论研究与应用 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1994.

(收稿日期: 2001-08-22 编辑: 马敏峰)

