

饱和粉煤灰抗液化强度室内试验研究

严 蕴, 余湘娟, 房 震

(河海大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210098)

摘要:通过某粉煤灰的室内动三轴试验, 得出了饱和粉煤灰在应变判别标准(动应变等于5%)和孔压判别标准(孔压等于周围压力)下的不同抗液化剪应力, 通过回归分析发现, 两种判别标准下的抗液化剪应力与振次之间的关系都可以用乘幂函数进行很好地拟合. 运用数理统计方法对这两种液化标准下的抗液化剪应力进行了误差分析, 发现孔压标准的拟合效果更好. 基于实测的粉煤灰孔压增长曲线提出孔压的对数模式.

关键词:饱和粉煤灰; 液化; 孔隙水压力; 试验研究

中图分类号: TU502

文献标识码: A

文章编号: 1006-7647(2002)05-0014-03

粉煤灰是火电厂烧煤后排出的残渣, 人们已经用它筑坝和修筑路堤. 采用通常的水力传送法得到的粉煤灰既疏松又饱和, 很容易液化, 因此, 要求对它的液化问题做深入的研究. 早在1985年, 曾国熙^[1]对粉煤灰的动剪切模量做了深入的研究和探讨, 1987年汪闻韶^[2~4]对粉煤灰液化特性做了全面的研究, 随后俞培基^[5]、林钰俊^[6]等对压实粉煤灰的动力特性做了研究. 本文基于某粉煤灰的室内动三轴试验, 分析了粉煤灰液化特性, 进一步探讨了粉煤灰的孔压增长模式, 讨论了不同液化标准对抗液化剪应力的影响, 此成果对地震作用下粉煤灰坝的抗液化稳定性分析具有重要意义.

1 试验及试验方法简述

试样的颗粒分析曲线见图1, 根据文献[7], 该粉煤灰料属细灰, 在压实后属于半透水材料, 强度高, 压缩性适中, 抗管涌性能差, 在饱和或松散条件下易液化. 室内动三轴试验采用一种初始固结比 $k_c = \sigma_1/\sigma_3 = 1.0$, 即等压固结, 其中 σ_1 为竖向压力, σ_3 为周围压力, 固结压力为 100 kPa, 200 kPa 和 300 kPa. 测试其抗液化剪应力. 制样干密度 0.95 g/cm^3 , 试样制备含水量为 50%, 分 5 层击实制备, 用抽真空法饱和.

2 试验结果分析

2.1 强度特性及不同液化标准对强度的影响

当 $k_c = 1.0$ 时, 将动三轴试验结果分别按孔压判别标准 $u = \sigma_3$ 和动应变 $\epsilon_d = 5\%$ 两个液化判别标准

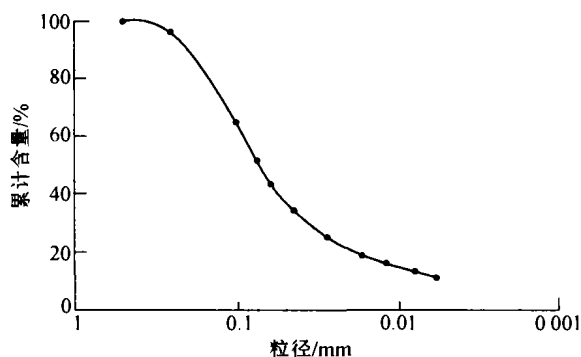


图1 颗粒分析曲线

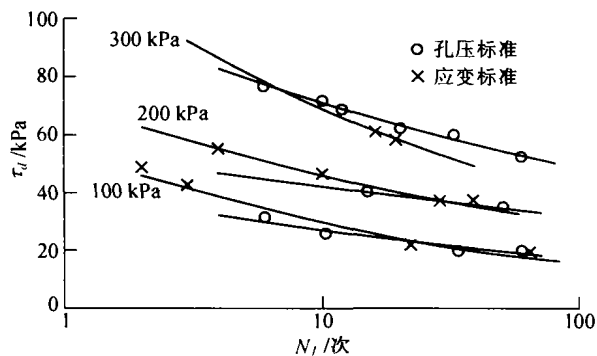


图2 不同液化判别标准下 $\tau_d \sim N$ 曲线

汇总于抗液化剪应力 τ_d 与振次 N 的关系图中(图2).

从图2中可以发现:

a. 图2中曲线都可以用乘幂函数很好地拟合, 即

$$\frac{1}{2} \sigma_d = AN_f^{-B} \quad (1)$$

式中: σ_d 为试验施加的轴向动应力, kPa; A, B 为试验参数; N_f 为破坏振次, 次. 试验所得的 A, B 值见

表 1.

表 1 $k_c = 1.0$ 时抗液化剪应力试验统计
回归误差计算结果

σ_3 /kPa	液化 标准	n	A	B	γ	F	回归效果 评价
100	1	4	43.319	0.2073	0.9721	34.3494	高度显著
	2	5	55.416	0.2790	0.9720	51.3321	高度显著
200	1	4	55.421	0.1214	0.9851	65.6179	高度显著
	2	5	70.763	0.1896	0.9797	71.6493	高度显著
300	1	4	104.550	0.1684	0.9868	74.2609	高度显著
	2	4	120.970	0.2447	0.9778	43.5507	高度显著

b. 两种判别标准所得到的曲线是相交的, 这和砂土有明显区别, 说明对于粉煤灰来说存在一个临界振次, 在临界振次以内应变判别标准所得的抗液化剪应力较大, 超过临界振次后则相反。

为了弱化资料整理中的人为因素影响, 利用数理统计中的 F 检验法^[8], 对每组试验在不同液化标准下的回归效果进行检验。 F 值由下式计算:

$$F = (n - 2) \frac{\gamma^2}{1 - \gamma^2} \quad (2)$$

式中: n 为参加回归分析的试验数据点数; γ 为相应于试验组次的回归分析的相关系数。

取显著性水平 $\alpha = 0.05, 0.005$ 。回归效果评判标准: $F > F_{0.95}(1, n - 2)$ 时, 可以认为回归效果“显著”; 当 $F > F_{0.995}(1, n - 2)$ 时可以认为回归效果“高度显著”。

从表 1 可以看出, 所有试验组次的统计回归效果均达到“高度显著”。相对而言, 孔压标准的试验结果拟合效果更好。如设在每一组中最大的相对误差半区间为 δ , 那么可以结合乘幂方程数理统计回归成果的离散程度进行描述。 δ 可以写为

$$\delta = \frac{|\Delta\tau_{di}|}{\bar{\tau}_{di}} \times 100\% \quad (3)$$

式中: δ 为每组试验中最大的相对误差半区间; $\bar{\tau}_{di}$ 为 $k_c = 1.0$ 对应的 σ_3 下由统计回归而求得的 τ_{di} 的估计值 ($i = 1, 2, \dots, n$); $|\Delta\tau_{di}|$ 为每组试验最大的绝对误差半区间, $\Delta\tau_{di} = |\tau_{di} - \bar{\tau}_{di}|$ 。

从表 2 可以看出, 本次试验最大的相对误差的半区间一般都不小于 10%。相对而言, 孔压判别标准的数理统计回归分析的试验误差小, 都在 6% 以内。

表 2 试验误差分析计算结果

σ_3 /kPa	$\delta/\%$	
	$u = \sigma_3$	$\epsilon = 5\%$
100	5.543	12.512
200	1.303	4.983
300	2.576	4.014

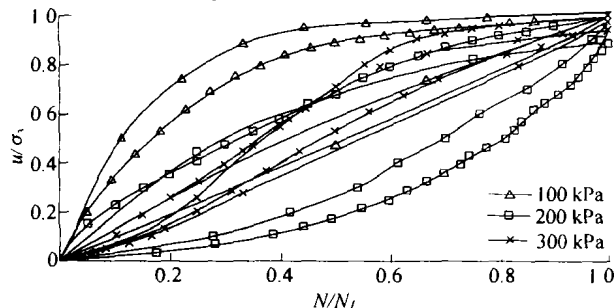
2.2 孔压增长规律分析

将试验过程中 $k_c = 1.0$ 时不同围压下的孔压变

化典型曲线绘于图 3。对图 3 中的试验点进行回归分析发现, 可以用对数函数很好地拟合, 函数表示为

$$\frac{u}{\sigma_3} = a \ln\left(\frac{N}{N_f}\right) + b \quad (4)$$

式中: u/σ_3 为孔压比; N/N_f 为振次比, N_f 为破坏振次, 取对应于 $\epsilon_d = 5\%$ 时的振次; a, b 为试验参数, 其中, $b = (u/\sigma_3)_{N=N_f}$, 即试验发生破坏时的孔压比。

图 3 $u/\sigma_3 \sim N/N_f$ 关系曲线

用式(4)来模拟孔压的增长规律既简单, 又方便, 并且参数少。另外, 从表 3 可以看出, 回归分析拟合的相关系数都在 85% 以上, 拟合效果较好。因此, 此种孔压的增长模型较好, 便于推广。同时由式(4)也可知, 孔压随振动次数增加而增大, 这和孔压发展的总体趋势是一致的。

表 3 回归参数

围压/kPa	序号	a	b	相关系数 γ
100	1	0.2193	1.0608	0.9479
	2	0.2773	1.0400	0.9897
	3	0.5205	0.9803	0.9955
	4	0.7358	0.9860	1.0000
	均值	0.4382	1.0168	
200	1	0.3206	0.9467	0.9711
	2	0.9427	1.0415	0.8696
	3	0.5994	0.7289	0.8628
	4	0.3247	0.9000	0.9965
	均值	0.5469	0.9016	
300	1	0.3925	0.9940	0.9659
	2	0.4218	0.9695	0.9800
	3	0.3800	0.8550	0.9492
	4	0.4668	0.8594	0.9705
	均值	0.4153	0.9195	

从表 3 中的拟合参数可以看出, 除个别点比较离散外, 其他的试验点相关性相当好。相对来说 b 值较稳定, 随固结压力的变化很小, 且在 0.9 ~ 1.0 之间, 这说明试验破坏时的孔压和固结压力已经很接近。 a 值在 0.41 ~ 0.55 之间变化。

不同固结压力下拟合所得的 a, b 均值见图 4。在 u/σ_3 与 $\ln(N/N_f)$ 平面内, b 值表示孔压比增长曲线的斜率。从图 4 可知, 固结压力为 200 kPa 时的 a 值最大, 说明此时孔压增长速度最快, 而固结压力为 100 kPa 和 300 kPa 时的孔压增长速度相近。

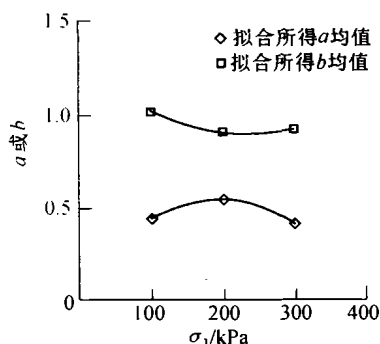


图4 拟合所得 a, b 的均值

3 结语与展望

a. 运用了两种液化判别标准对饱和粉煤灰抗液化强度进行了讨论,发现孔压标准和应变标准所得液化剪应力与振次曲线都可以用乘幂函数进行很好地拟合,通过数理统计分析,发现孔压标准的试验结果拟合效果更好。

b. 提出了粉煤灰临界振次 N_{cr} 的概念。两种判别标准所得强度曲线相交,以临界振次 N_{cr} 为界,振次小于 N_{cr} 时,应变标准的强度值较大;相反则孔压标准的强度值大。基于此规律,笔者认为,液化判别标准的选取间接地与等效振次有一定的关系。

c. 基于饱和粉煤灰的动三轴试验,得到孔压的发展规律,即孔隙水压力与破坏振次比呈良好的对数函数关系,该孔压模式既简单又便于推广。

参考文献:

- [1] 曾国熙,顾尧章,吴建平.粉煤灰的动剪切模量[J].岩土工程学报,1985,7(5):1~9.
- [2] 汪闻韶,秦蔚琴,何昌荣.粉煤灰的抗剪强度和液化强度[J].岩土工程学报,1987,9(1):109~112.
- [3] 汪闻韶,秦蔚琴.富拉尔基电厂粉煤灰强度和液化特性[A].水利水电科学研究院科学研究论文集(第27集)[C].北京:水利电力出版社,1987:235~250.
- [4] 汪闻韶.土的动强度和液化特性[M].北京:中国电力出版社,1997.
- [5] 俞培基,秦蔚琴.压实“干”粉煤灰的动力特性[J].岩土工程学报,1988,10(5):67~72.
- [6] 林钰俊.压实粉煤灰的液化特性[J].岩土工程学报,1988,10(5):84~86.
- [7] 陈愈炯,俞培基,李少芬.粉煤灰的基本性质[J].岩土工程学报,1988,10(5):3~15.
- [8] 徐刚,潘恕,姬美秀,等.粗粒土动强度试验成果的分析方法[J].岩土力学,1998,19(2):63~66.

(收稿日期:2002-06-30 编辑:张志琴)

《岩土工程学报》征订启事

《岩土工程学报》是关于土力学和岩石力学理论及实践的学术性科技期刊,创刊于1979年,由我国水利、土木、力学、建筑、水电和振动6个全国性学会联合主办,沈珠江院士任该刊主编。主要刊登岩土工程领域中的新理论、新技术、新方法、新仪器和新材料等,报道重大的岩土工程实录、先进的岩土工程科研成果和与岩土工程相关的信息动态。主要栏目有黄文熙讲座、论文、短文、工程实录、展望21世纪岩土力学、焦点论坛和学术讨论等。

《岩土工程学报》是我国建筑和水利两个学科的中文核心期刊,分别于1999年和2001年获“自然科学基金性、高科技学术期刊经费”资助,先后被美国工程索引 Page One(EI Page One),Current Awareness Service 和中国期刊网等10家国内外评价与检索系统收录,并获得中国科学技术协会、水利部和江苏省优秀期刊荣誉称号。

《岩土工程学报》适合于土木建筑、水利电力、交通运输、矿山冶金、工程地质领域中从事岩土工程专业的科研、设计、施工、监理人员和大专院校师生。

《岩土工程学报》国内外公开发行人,双月刊,大16开本,双栏排版,120页,单月30日出版,每期定价10元,全年定价60元。国际标准刊号 ISSN1000-4548,国内统一刊号 CN32-1124/TU,国内发行代号 28-62,国外发行代号 BM520,广告许可证号:江苏省工商行政管理局许可证 3200004020630。

编辑部地址:南京市虎踞关34号(210024)

电话:(025)5829553,5829556

传真:(025)5829555

网址: <http://www.cgejournal.com>

E-mail: ge@njhri.edu.cn