

DOI: 10.11779/CJGE201503005

饱和黏性土抗剪强度的试验方法

滕延京, 盛志强, 王曙光

(中国建筑科学研究院地基基础研究所, 北京 100013)

摘要: 饱和黏性土的工程特性, 与其应力状态密切相关。自然状态的地基土固结应力状态以及工程设计工况的应力状态, 是确定地基土抗剪强度试验方法必须考虑的问题。通过原状土的土工试验, 分析研究饱和黏性土抗剪强度试验方法及对其抗剪强度指标的影响, 提出现场取得的不扰动土样, 在试验室进行抗剪强度试验, 必须进行恢复土样初始应力状态的预处理; 应针对实际工程问题需要, 确定固结压力及排水条件进行土样的剪切试验; 资料整理时应区分工程应用的应力条件, 小于前期固结压力的压力段和大于前期固结压力的压力段分别进行统计分析, 确定抗剪强度指标。

关键词: 饱和黏性土; 抗剪强度; 应力历史; 固结状态

中图分类号: TU443 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2015)03-0426-06

作者简介: 滕延京(1949-), 男, 研究员, 从事岩土工程及地基基础工程技术研究工作。E-mail: tyjcabr@sina.com。

Test method for shear strength of saturated cohesive soil

TENG Yan-jing, SHENG Zhi-qiang, WANG Shu-guang

(Institute of Foundation Engineering, China Academy of Building Research, Beijing 100013, China)

Abstract: The engineering properties of saturated cohesive soil are closely related to its stress state. In order to choose the method for shear strength tests correctly, the stress state of foundation soil under natural condition and engineering design must be considered. Through geotechnical tests on undisturbed soil, the influence of test methods on shear strength indexes is analyzed. It is proposed that disturbed soil samples derived from the field should be pretreated in the lab for shear strength tests so as to restore their initial stress state. According to the need of practical engineering problems, shear tests on soil samples should be performed to determine consolidation pressure and drainage conditions. In order to determine shear strength indexes, stress conditions of engineering application are supposed to be distinguished. Moreover, statistical analysis about the test data should be carried out respectively for the pressure section which is greater than the previous consolidation pressure and that which is smaller than the previous consolidation pressure.

Key words: saturated cohesive soil; shear strength; stress history; consolidation state

0 引言

饱和黏性土的工程特性指标, 由于重塑土样难于正确模拟土的沉积、固结历史, 应采用原位试验或通过原状土的室内试验测定。饱和黏性土的工程行为, 与其应力历史关系密切, 图1所示结果^[1]可知, 在不同的应力和应力历史条件下, 地基土的应力应变、固结变形、抗剪强度等工程特性应采用不同的指标表达。

国内几个软土地基基坑坍塌事故原因分析, 引起一些专家、学者对于饱和黏性土抗剪强度及其试验方法的讨论^[2], 对于实际工程中确定饱和黏性土的工程性质, 正确使用其抗剪强度指标起到了积极的作用。实际上, 目前工程勘察提供的饱和黏性土的工程特性指标, 尚未体现地基土应力历史的影响, 工程设计人员也未按照实际工程的应力条件采用相应的设计参数, 使得工程设计的安全性, 过于依靠“工程经验”,

造成某些工程的安全隐患。为了进一步梳理工程设计的合理性、试验方法的适用性, 使得计算参数选取符合地基土的实际工程行为, 进行了饱和黏性土模拟土的固结及应力历史条件下的室内试验, 提出饱和黏性土抗剪强度的试验方法。

1 室内试验确定抗剪强度的方法及抗剪强度指标

1.1 地基土的原始状态及其抗剪强度指标

残积土、沉积土、填土等, 由于其成因、土性、地下水条件等不同, 原始应力状态影响其工程性质; 正常固结土、超固结土、欠固结土不仅变形性质不同, 抗剪强度也有很大不同。室内土工试验确定地基土的

表 1 试样物理指标

Table 1 Physical parameters of samples

土样	取土深度 <i>d/m</i>	土的 分类	含水率 <i>w₀/%</i>	密度 <i>ρ / (g·cm⁻³)</i>	孔隙比 <i>e</i>	液限 <i>w_L/%</i>	塑限 <i>w_P/%</i>	塑性指数 <i>I_P</i>	液性指数 <i>I_L</i>	备注
原状土 A	18.5	粉土	19.58	2.07	0.56	20.80	11.10	9.70	0.87	含大量贝壳
原状土 B	20.5	粉质黏土	31.23	1.90	0.84	38.29	23.56	14.73	0.52	灰色, 少许贝
原状土 C	20.5	粉质黏土	30.06	1.92	0.85	37.30	26.80	10.50	0.31	壳, 含有机质
原状土 D	20.5	粉质黏土	37.46	1.90	0.96	40.10	26.40	13.70	0.81	
原状土 E	22.5	粉质黏土	23.90	2.04	0.64	27.00	16.40	10.60	0.71	褐色、灰色,
原状土 F	22.5	粉质黏土	23.65	2.04	0.64	27.51	17.48	10.03	0.62	有粉土团, 少
原状土 G	22.5	粉质黏土	22.78	2.10	0.56	26.82	16.63	10.19	0.60	量贝壳
原状土 H	24.5	粉质黏土	22.70	2.05	0.63	32.90	17.40	15.50	0.34	
原状土 I	24.5	粉质黏土	22.92	2.06	0.62	31.55	20.38	11.17	0.23	褐黄色, 含姜石
原状土 J	24.5	粉质黏土	21.71	2.08	0.59	30.64	18.60	12.04	0.26	

注: 原状土取土工作由天津市工程地质勘察设计研究院完成, 抗剪强度试验要求采用不扰动土样进行试验^[3], 保证土样试验前的原始应力状态是土工试验正确测定其力学性质的基本要求。从现场取得的土样, 在实验室试验确定地基土的抗剪强度开始前的工作, 应进行确定其原始状态参数的试验, 包括静止侧压力系数 K_0 、前期固结压力 p_c 、超固结比 OCR 等, 再根据现场勘测的埋深、地下水条件, 确定土样的原始应力状态; 剪切试验开始前应对土样进行恢复原始应力状态和固结状态的预处理, 并应根据工程设计的实际情况确定试验采用的固结排水条件, 确定抗剪强度。

并严格按照规范要求的饱和黏性土现场取土要求操作取样。

津市塘沽区海河南岸, 西起头道桥路, 东至闸南路的地段。土样取土深度位于地表下 18.5, 20.5, 22.5, 24.5 m, 地下水位埋深 1.5 m, 土样的基本物理力学指标见表 1, 前期固结压力、 K_0 试验结果见表 2。试验结果可知, 试验土样为正常固结的饱和黏性土。直剪试验采用快剪, 在有效自重压力下预固结, 剪切时的垂直压力分别为 50, 100, 150, 200, 300, 400, 500 kPa; 三轴试验(如埋深 20.5 m 的试样)采用自重压力(静止侧压力 σ'_r 为 80 kPa)下预固结后分别在 20, 40, 60, 80, 130, 180, 280 kPa 围压下的不固结不排水剪(即剪切时改变围压后不再固结)。埋深 18.5 m 的土样含贝壳等杂质较多, 代表性差, 不做三轴剪切试验。埋深 20.5 m 的试验结果分别见图 2、图 3。图 2 直剪试验结果可知, 抗剪强度在前期固结压力的两侧表现为明显不同的规律, 垂直压力小于前期固结压力的抗剪强度指标 $c=55.25$ kPa, $\varphi=8.01$; 垂直压力大于前期固结压力的抗剪强度指标 $c=82.09$ kPa, $\varphi=2.29$ 。图 3 三轴试验结果可知, 抗剪强度在前期固结压力的两侧也表现为明显不同的数值, 围压小于前期固结压力(静止侧压力 σ'_r)的抗剪强度指标 $c=57.4$ kPa, $\varphi=7.1$; 围压大于前期固结压力(静止侧压力 σ'_r)的抗剪强度指标 $c=98.4$ kPa, $\varphi=1.2$ 。其他埋深的土样试验结果具有同样的规律。试验结果可知, 土工试验确定地基土的抗剪强度指标时, 试验上覆压力(或围压)的范围应以前期固结压力为限, 大于或小于前期固结压力的结果分别处理, 按照工程设计实际的应力路径和应力状态分别采用, 才能符合地基土的抗剪强度特性。

目前岩土工程勘察报告提供的地基土抗剪强度指标, 一般采用“习惯”的竖向压力或围压, 并未考虑

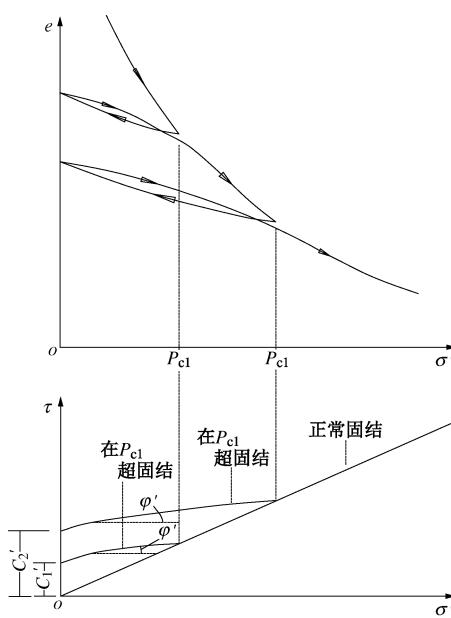


图 1 土的应力历史及抗剪强度

Fig. 1 Stress history and shear strength of soil

为了确定正常固结土、超固结土抗剪强度指标的差异, 进行了饱和黏性土的试验。试验用土样取自天

表 2 土样的原始应力状态

Table 2 Stress history of soil samples

土样	深度 <i>d/m</i>	土的 分类	<i>K₀</i>	前期固结压力 <i>p_c/kPa</i>	有效自重应力 <i>σ'_z/kPa</i>	有效周围应力 <i>σ'_r/kPa</i>
原状土 B	20.5	粉质黏土				
原状土 C	20.5	粉质黏土	0.366	192	194.85	72.2
原状土 D	20.5	粉质黏土				
原状土 E	22.5	粉质黏土				
原状土 F	22.5	粉质黏土	0.394	209	211.85	83.5
原状土 G	22.5	粉质黏土				
原状土 H	24.5	粉质黏土				
原状土 I	24.5	粉质黏土	0.414	246	228.85	94.8
原状土 J	24.5	粉质黏土				

注: *K₀* 固结试验数据由北京市勘察设计研究院土工试验室提供。

工程使用时的实际应力状态,使得提供的抗剪强度指标偏于保守,或存在安全隐患。

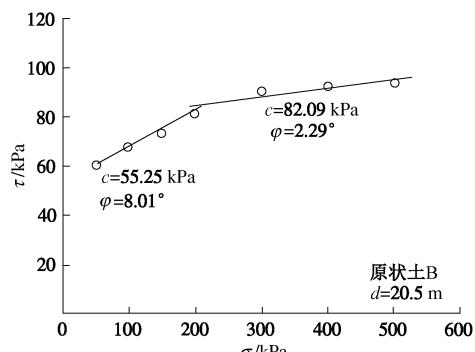


图 2 20.5 m 埋深土样直剪试验

Fig. 2 Direct shear tests on soil sample with depth of 20.5 m

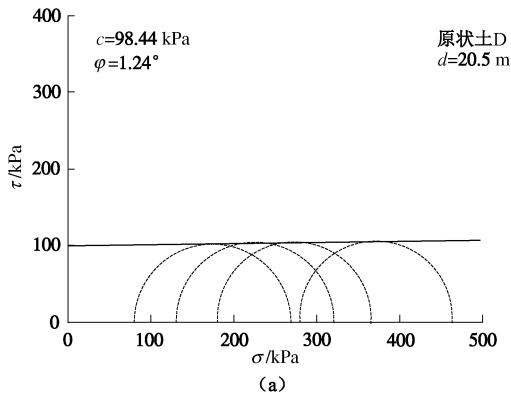
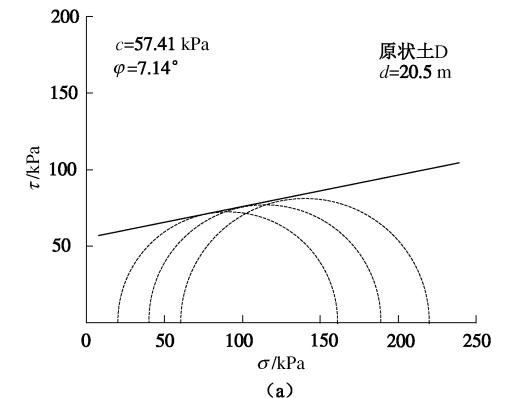


图 3 20.5 m 埋深土样三轴试验

Fig. 3 Triaxial tests on soil sample with depth of 20.5 m

1.2 室内剪切试验的工程模拟

边坡稳定性、支护结构土压力及地基承载力等计算结果的可靠性,很大程度上取决于抗剪强度指标的正确测定与选用。Bishop 等^[4]通过大量饱和土不排水直剪试验提出了确定不排水抗剪强度的方法; Ladd^[5]进行了大量室内试验并建立了 SHANSEP 方法; Mayne^[6]给出了正常固结土和超固结土抗剪强度的关系; 胡海军等^[7]比较了不同测试方法,建立了采用各向等压固结试验模拟现场 *K₀* 固结的等效围压计算公式。上述研究结果均使得土体(尤其黏性土)抗剪强度测试方法有了很大改进,但也各有其适用条件,且没有强调不同施工阶段地基土实际应力状态引起的土体强度特性的变化。实际工程的饱和黏性土,自然状态下具有不同的应力和固结状态;而在使用阶段,由于是在基坑开挖后建造,其上覆压力可能大于或小于前期固结压力。

在建造期间饱和黏性土因其土性排水条件差,不能充分固结,工程模拟的最不利工况是土样在各级荷载作用下不固结不排水剪确定抗剪强度。考虑到测试方法的简单易行性及其在勘察测试中的普及性,采用直剪试验时应在有效自重压力下预固结,然后实施快剪;三轴剪切试验应采用自重压力下预固结后在各级荷载作用下进行不固结不排水剪。

针对实际工程的有效固结压力的模拟,分别进行了 *K₀* 应力以及 $(\sigma'_z + 2\sigma'_r)/3$ 、 σ'_r 均匀压力预固结的不固结不排水剪试验比对,试验结果见表 3。可以认为 *K₀* 应力状态预固结应该最接近实际土层的受力状态,从表中试验结果可知,其与 $(\sigma'_z + 2\sigma'_r)/3$ 均匀围压预固结的试验结果抗剪强度接近,而采用 σ'_r 均匀压力预固结的抗剪强度偏低。工程试验时为减少偏压固结试验的困难,可采用 $(\sigma'_z + 2\sigma'_r)/3$ 均匀围压预固结的试验结果。

1.3 自重应力下预固结的不固结不排水剪切试验与固结不排水剪切试验模拟工况的异同

自重压力下预固结的不固结不排水剪切试验,其

自重压力下预固结是指剪切试验开始前对土样进行恢复原始应力状态和固结状态的预处理过程, 而不固结不排水剪切是指剪切试验施加围压后不固结, 剪切过程中不排水的试验方法。可以说这种试验方法适合于所有地基土确定其抗剪强度的情况, 特别对于饱和黏性土可以直接得到模拟工程实际的抗剪强度。

表 3 不同固结状态下三轴 UU 试验结果

Table 3 Results of triaxial UU tests under different consolidation states

试验 编号	取土深度 <i>d/m</i>	预固结 状态	$(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ /kPa
1	20.5	K_0	213.5
		$(\sigma'_z + 2\sigma'_r)/3$ 均压	207.2
2	22.5	σ'_r 均压	161.3
		K_0	237.1
3	24.5	$(\sigma'_z + 2\sigma'_r)/3$ 均压	224.8
		σ'_r 均压	193.4
		K_0	224.7
		$(\sigma'_z + 2\sigma'_r)/3$ 均压	217.3
		σ'_r 均压	170.1

固结不排水剪切试验, 没有强调固结压力与土样原始应力状态和固结状态的关联性。实际操作中如果固结压力与前述土样的自重压力下预固结的应力状态一致, 试验应得到相同的抗剪强度; 如果固结压力大于土样原始固结压力, 其试验得到的抗剪强度是土样在假定固结压力下的抗剪强度, 由于固结压力高于实际土层的固结压力, 得到的土样抗剪强度偏大; 而如果固结压力小于土样原始固结压力, 同样改变了实际土层的固结压力, 土样的抗剪强度可能偏小。

采用埋深 20.5 m 的土样试验作比较, 试验的结果见图 4。试验结果可知, 采用固结不排水剪切试验, 也应区分前期固结压力两侧的不同压力段, 进行抗剪强度指标的整理。自重压力下预固结的不固结不排水剪切试验与固结不排水剪切试验确定的抗剪强度在固结压力相同时基本一致; 固结压力大于前期固结压力的应力段, 固结不排水剪的抗剪强度明显大于自重压力下预固结的不固结不排水剪的抗剪强度; 固结压力小于前期固结压力的应力段, 两种试验的结果 c , φ 的分布规律不同, 自重压力下预固结的不固结不排水剪的抗剪强度指标 c 值小, φ 值大; 而在固结压力大于前期固结压力的应力段, 固结不排水剪的抗剪强度指标 c 值小, φ 值大。

实际工程的饱和黏性土地基, 如果认为成因相同, 沉积历史相同, 地下水条件相同, 一般情况下其抗剪强度应沿深度逐渐增大, 在剪切试验中其土样抗剪强

度随固结压力增大而增大的规律明显, 完全可以验证。

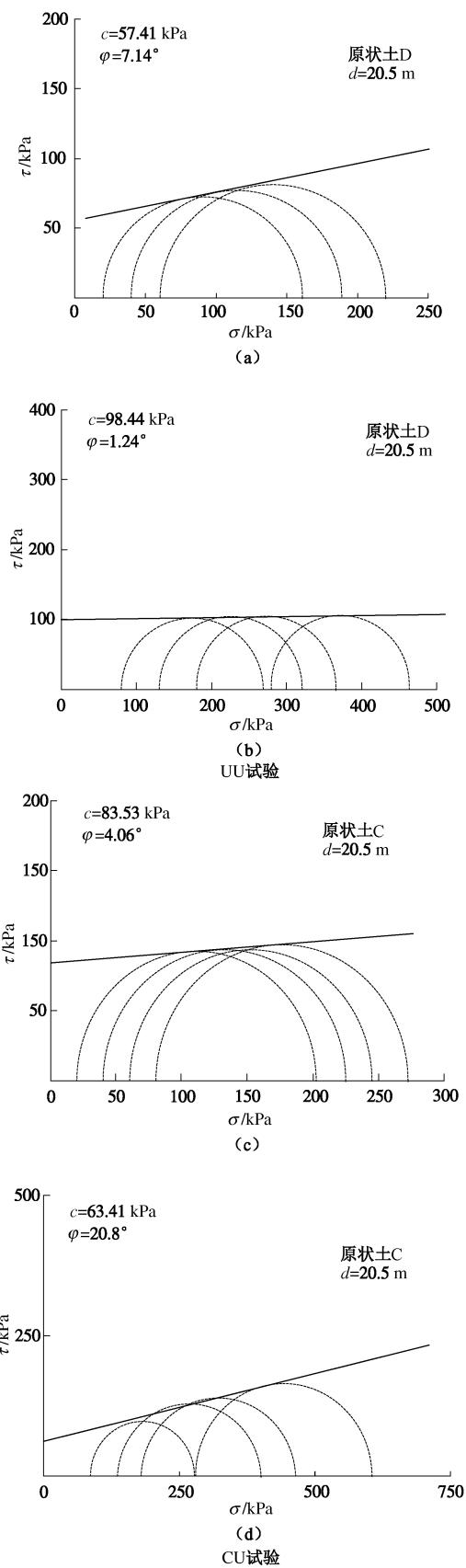


图 4 三轴压缩试验

Fig. 4 Triaxial compression tests

2 工程应用的几个问题

上面所谈的问题主要是地基土的抗剪强度试验方法和模拟工程实际的认识。作为地基基础设计^[8]采用的设计参数，应考虑房屋结构建造和使用过程中地基基础的可能最不利工况的安全性控制，例如工程勘察时判定的地下水位及其浮动范围在未来使用期间的变化，特别对于场地排水条件及地下管线渗漏对地基土承载特性和变形特性的影响，非饱和土的试验结果在使用过程中是否可能变成饱和土的可能性；地下水位升高对地基土变形的影响等问题。对于工程设计采用的抗剪强度指标应采用工程最不利工况的实际应力状态和应力路径，通过试验取得。

2.1 地基承载力设计采用的抗剪强度指标

地基承载力计算，在大多数工程是对地基的加载过程，某些工程（例如纯地下工程）地基土可能处于卸荷状态。在地基承载力设计中采用的抗剪强度指标，应视房屋地基使用中可能达到的最大基底压力与实际土层地基土的应力、固结状态，采用不同的抗剪强度指标分析计算。房屋地基使用中可能达到的最大基底压力若小于土体的前期固结压力（例如纯地下工程），应采用小于等于土样前期固结压力段的抗剪强度指标；若大于土体的前期固结压力，应采用大于等于土样前期固结压力段的抗剪强度指标。房屋地基土的最终固结完成，需5~8年时间，对于饱和黏性土来说，排水条件更差，所以工程采用自重压力预固结的不固结不排水剪抗剪强度指标进行地基承载力设计认为是合理且安全的。

2.2 基坑工程设计采用的抗剪强度指标

基坑工程控制工况大部分是土体卸荷情况下的稳定性问题，即在天然土体在原始应力和固结状态下开挖基坑土体卸载情况下的作用和抗力进行的稳定性计算。其采用的抗剪强度指标应属于卸荷应力路径的指标。基坑开挖的被动区的抗力计算，应采用卸荷段的抗剪强度指标（主要上覆压力减少），其应力的范围应在小于前期固结压力的应力段；基坑开挖的主动区的作用计算，应采用卸荷段的抗剪强度（主要周围压力减少），其应力的范围也在小于前期固结压力的应力段。

对于饱和黏性土地基的基坑工程设计采用的抗剪强度指标，亦应采用自重压力下预固结的不固结不排水剪切试验得到的抗剪强度指标，与地基承载力设计采用指标的不同在于应力路径和固结状态不同。

2.3 不考虑土的应力历史试验资料整理的工程问题

工程设计采用的地基土抗剪强度指标应考虑所设

计工程问题的土体应力状态和使用指标的安全性^[9]。土体应力状态主要指地基工作是加荷还是卸荷，而采用相应应力段的抗剪强度指标；使用指标的安全性是指所采用抗剪强度指标对应的土体固结排水条件。

目前土工试验的试验条件及资料整理并未与实际工程工况相对应，主要问题在于：

(1) 试验采用土样在未确定地基土的现场应力条件和固结状态，一律按正常固结土直接在假定的固结压力进行剪切，测定的抗剪强度指标未考虑实际工程的应用范围；

(2) 试验资料整理未区分实际土层在工程使用的不同应力段的指标差异，按统一的统计回归方法得到抗剪强度指标，使得测定的抗剪强度指标在实际工程设计中采用的抗剪强度在卸荷段偏高，而在加荷段偏低。

这些问题对于饱和黏性土地基，使得基坑工程采用的抗剪强度指标不符合设计工况要求，影响了工程设计的安全性，应加以改进。

3 对抗剪强度试验方法的建议

上述问题的讨论，主要针对饱和黏性土地基，其实对于所有工程地基土的抗剪强度试验及其抗剪强度指标的使用，其概念是一样的，以此提出针对目前岩土工程抗剪强度试验方法的建议。

(1) 现场取得的不扰动土样，在试验室进行抗剪强度试验，应进行测定土样原始状态参数的试验，包括 K_0 、前期固结压力等，剪切试验开始前应使土样在原始应力状态预固结。

(2) 应针对实际工程问题需要，进行土样的剪切试验。其中对于基坑工程设计其试验压力选择应包括自重压力下预固结的不固结不排水剪切试验，剪切时的上覆压力或围压在小于自重上覆压力的点数不应少于3点。对于地基承载力设计其试验压力选择应包括自重压力下预固结的不固结不排水剪切试验，剪切的上覆压力或围压在大于自重上覆压力的点数不应少于3点。

(3) 试验结果资料整理应区分不同压力段分别进行统计分析，即小于前期固结压力的压力段和大于前期固结压力的压力段分别整理。

参考文献：

- [1] 斯科特 C R. 土力学及基础工程[M]. 钱家欢, 等译. 北京: 水利电力出版社, 1983. (SCOTT C R. An instruction to soil mechanics and foundation[M]. QIAN Jia-huan, et al, trans. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1983. (in

- Chinese))
- [2] 李广信. 对与基坑工程有关的一些规范的讨论(1)[J]. 工程勘察, 2013, 41(9): 1 - 6. (LI Guang-xin. Discussion on some codes concerned with building foundation pit(Part 1)[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2013, 41(9): 1 - 6.(in Chinese))
- [3] GB50021—2001(2009 版) 岩土工程勘察规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009. (GB50021—2001(2009 edition). Code for investigation of geotechnical engineering[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2009. (in Chinese))
- [4] BISHOP A W, BJERRUM L. The relevant of the triaxial test to the solution of stability problem[C]// Proc Res Conference on Shear Strength of Cohesive Soils. Colorado: University of Colorado, ASCE, 1960: 437 - 501.
- [5] LADD C C. Stability evaluation during stage construction[J]. Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1991,
- [6] MAYNE P W. Cam-clay prediction of undrained strength[J]. Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1980, 106(6): 1219 - 1242.
- [7] 胡海军, 魏丽敏, 冷伍明. 黏土强度指标的测定和选取[J]. 岩土力学, 2007, 28(12): 2698 - 2704. (HU Hai-jun, WEI Li-min, LENG Wu-ming. Determination and choice of strength index of clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(12): 2698 - 2704. (in Chinese))
- [8] GB50007—2011 建筑地基基础设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011. (GB50007—2011 Code for design of building foundation[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2002. (in Chinese))
- [9] 华南工学院.地基及基础[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1981. (South China Institute of Technology. Foundation ground and foundation[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1981. (in Chinese))

2015 年度黄文熙讲座学术报告会将于 4 月 11 日在南京举行

2015 年度黄文熙讲座学术报告会将于 2015 年 4 月 11 日(星期六)在南京水利科学研究院水文水资源大楼 12 楼综合会议厅举行。2015 年黄文熙讲座主讲人分别为: 南京水利科学研究院陈生水教授级高工, 讲座题目为“土石坝试验新技术研究与应用”; 北京航空航天大学姚仰平教授, 讲座题目为“UH 模型系列研究”。讲座文稿已分别刊登在《岩土工程学报》2015 年第 1 期和第 2 期的黄文熙讲座栏目。4 月 12 日上午举行《岩

土工程学报》编委会前主任兼主编沈珠江院士铜像揭幕仪式和《岩土工程学报》编委会全体会议, 请《岩土工程学报》第十一届编委会全体编委出席活动。黄文熙讲座学术报告会期间, 还将邀请有关学者专家做学术报告。热烈欢迎全国岩土工程界的专家学者及各有关单位的代表参会。有关本次学术报告会的报到及住宿等具体事项请关注本刊网站 (www.cgejournal.com) 发布的通知。

(本刊编辑部)