

太原粉质粘土强度指标的空间概率特征研究*

The spatial probabilistic characteristics of strength indexes for Taiyuan silty clay

李小勇¹, 谢康和¹, 白晓红², 史美筠²

(1. 浙江大学 土木工程学系, 浙江 杭州 310027; 2. 太原理工大学 土木工程学系, 山西 太原 030024)

摘要: 根据工程勘察资料和室内强度试验, 对太原地区粉质粘土的强度指标空间概率特征进行了统计分析和实验研究, 得出了强度指标空间变异系数的变化规律, 建立了强度指标的 Beta 分布概率模型, 拟合了物理指标与强度指标间的经验关系。另外, 还对太原地区粉质粘土的强度指标测定方法的不确定性以及不同实验方法相关性进行了实验研究。

关键词: 太原地区; 粉质粘土; 强度指标; 空间变异系数; 概率模型; 经验关系

中图分类号: TU 411.7

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2000)06-0668-05

作者简介: 李小勇, 男, 1970 年生, 浙江大学岩土工程专业博士生。主要研究方向是岩土工程的可靠性。

LI Xiao-yong¹, XIE Kang-he¹, BAI Xiao-hong², SHI Mei-yun²

(1. Department of Civil Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2. Department of Civil Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: This paper, based on statistical analyses of the observed data, dealt with the spatial probabilistic characteristics of shear strength indexes for silty clay in Taiyuan. The statistical data were obtained on the basis of the engineering geologic investigation reports and strength tests in lab. The spatial variability coefficients of the indexes for Taiyuan silty clay were compiled. And also the Beta distribution for strength indexes of Taiyuan silty clay was established. Finally the paper studied the correlation between indexes and got some empirical equations. Besides, the paper studied thoroughly the correlation between the strength indexes of different tests, and the uncertainty of strength test method.

Key words: Taiyuan district; silty clay; strength indexes; spatial variability coefficient; probabilistic distribution; empirical equations

1 前言*

目前, 我国国标《建筑地基基础设计规范》(GBJ7—89), 正在按国标《建筑设计统一标准》的要求, 采用以概率理论为基础的极限状态设计法进行修订, 有许多基础性的研究工作要开展。本文在前人研究的基础上, 在以下几方面进行了研究和探索: ①统计分析: 太原粉质粘土强度指标的空间变异系数、概率分布模型、物理指标与强度指标间的经验关系; ②实验研究: 太原粉质粘土强度指标测定方法的不确定性以及不同实验方法间的相关性。

2 太原土层的野外地质特征

土的工程性质与土的形成历史密切相关。太原盆地是新生代以来受燕山—喜马拉雅山运动影响所形成的断陷盆地。汾河自北向南纵贯盆地中部, 汾河两岸形成阶地, 分别与东山洪积平原、西山洪积平原相连。

太原平原的顶部为全新世地层, 广泛发育了河流沉积。根据太原市工程地质系列图, 盆地内沉积了厚达 100 m 以上的第四纪沉积物。本文以第四系全新统早期河流相粉质粘土冲洪积物为研究对象。

根据大量的钻孔资料, 可得出粉质粘土层的野外

特征是: ①地下水位较浅, 粉质粘土一般呈饱和状态; ②颜色呈褐色; ③下部饱和粉质粘土层常呈可塑状态, 压缩性中等, 而上部饱和土层常呈软塑到流塑状态, 压缩性较高; ④粉质粘土常含有少量的结核体, 以及少量的钙质菌丝, 有的土层含有少量的铁锰质斑点和粉土、粉细砂透镜体。

3 统计分析

3.1 强度指标的空间变异性

岩土是在漫长的地质年代里形成的, 是自然历史的产物, 是在人类无力控制的条件下形成的。因此, 岩石的性状表现出很大的变异性。

土性指标具有空间相关性, 土性的空间自相关性概念是由 Cornell(1973) 首先提出的, 土层中的任意两点的特性存在着自相关性, 随着两点距离的增加, 这种相关性减少; 反之, 自相关性增加。描述土性空间自相关性比较合理的方法是 Vanmarcke 于 1977 年提出的随机场模型^[1]。随机场理论用方差折减系数把土性“点”变异性与空间变异性联系起来, 而方差折减系数

* 基金项目: 山西省自然科学基金资助项目(981044)

收稿日期: 2000-05-26

取决于土性的相关距离和空间范围。

(1) 强度指标的相关距离

结合工程实践,对强度指标竖直向和水平向的相关距离进行了对比研究,其结果列于表 1。表 1 中水平向 5 个方向大致成 30°。从表 1 可以看出:①水平向相关距离远远大于竖直向;②内摩擦角的相关距离与相应的粘聚力的相关距离以及水平向各方向的相关距离比较一致。表 2 统计了太原粉质粘土强度指标的相关距离。

相关距离是描述土性的自相关性特征的指标,是土层固有的一种特性,它可以表示土的物理力学特性在空间随机分布的自相关规律,是一个几何参数,它的物理意义在于度量土体中密切相关的单元体大小。相关距离受土层的物质组成、沉积年代、成因条件的影响。土层地质形成过程中,在竖直向上是“逐渐”形成的,而在水平向上是大面积“一次”形成的,因此土性在竖直向上比较“离散”,而在水平向上比较“均匀”,水平向的相关距离比竖直向的大得多。

表 1 强度指标竖直向和水平向的相关距离对比

Table 1 Comparison of horizontal and vertical correlation distances of strength indexes

编号	指标	竖直向	水平向相关距离 δ/m				
		δ/m	1	2	3	4	5
1	内摩 擦角	0.42	36.42	36.28	36.52	36.65	36.36
2		0.47	36.82	36.75	36.66	36.79	36.89
3		0.58	38.15	38.26	38.09	38.43	38.34
4		0.65	39.23	39.45	39.62	39.59	39.47
5		0.72	40.52	40.55	40.65	40.38	40.48
6		0.75	40.48	40.38	40.57	40.42	40.43
1	粘聚 力	0.45	36.48	36.25	36.48	36.65	36.42
2		0.44	36.78	36.86	36.54	36.74	36.91
3		0.52	38.24	38.32	39.15	38.34	38.35
4		0.64	39.32	39.41	39.57	39.54	39.56
5		0.78	40.41	40.47	40.66	40.45	40.55
6		0.71	40.45	40.45	40.65	40.45	40.40

表 2 强度指标的相关距离

Table 2 Correlation distances of strength indexes

项 目	相关距离 δ/m	均值/m	变异系数	统计样本
竖直向	0.32~ 0.78	0.59	0.15	100
水平向	35.2~ 42.6	39.4	0.17	6

(2) 强度指标的空间变异系数

岩土参数的空间变异系数 δ 是一个能够综合反映岩土参数质量水平的指标。空间变异系数 δ 定义为标准差 σ 与平均值 μ 的比值,即 $\delta=\frac{\sigma}{\mu}$ 。

本文根据太原建筑工程的钻孔实验资料,对粉质粘土强度指标的平均值 μ 和变异系数 δ 进行了统计,结果见表 3。

表 3 强度指标空间变异系数

Table 3 Spatial variability coefficient of strength indexes

编号	项目	三轴指标		直剪指标	
		$\varphi_{cu}/(^{\circ})$	c_{cu}/kPa	$\varphi_q/(^{\circ})$	c_q/kPa
1	μ	14.19	27.9	13.7	46.6
	δ	0.276	0.239	0.158	0.112
	N	7	7	7	7
2	μ	10.5	21.2	16.8	29.8
	δ	0.352	0.272	0.222	0.158
	N	11	11	8	8
3	μ	9.13	54.5	28.4	31.5
	δ	0.229	0.213	0.150	0.117
	N	12	12	17	17
4	μ	11.46	59.08	20.3	30.1
	δ	0.301	0.290	0.162	0.151
	N	8	8	8	8
5	μ	7.4	45.6	18.2	17.7
	δ	0.150	0.124	0.276	0.210
	N	7	7	10	10
6	μ	8.2	35.46	16.1	38.2
	δ	0.240	0.185	0.198	0.165
	N	11	11	6	6
7	μ	10.5	30.21	25.1	19.2
	δ	0.291	0.210	0.165	0.143
	N	9	9	13	13
8	μ	14.1	20.5	20.0	22.4
	δ	0.155	0.126	0.230	0.170
	N	12	12	13	13

通过分析可以得出如下几点看法:①内摩擦角和粘聚力的空间变异系数一般大于 0.10,而且变化范围较大,因此强度指标的变异性对地基承载力、边坡稳定性、基坑支护和挡土墙土压力的计算结果影响比较大;②统计分析发现,太原粉质粘土的不排水强度指标,直剪内摩擦角数值普遍大于三轴内摩擦角,而三轴粘聚力数值普遍大于直剪粘聚力。

3.2 强度指标的概率分布

β 分布是适应性很广的一种分布模型。本文用 β 分布对太原粉质粘土强度指标进行了拟合,其结果见表 4。为便于不同分布拟合结果的比较,这里引用了接受水平 K_{H0i} 的概念^[2]。

从表 4 拟合优度检验结果可知:4 个不排水强度指标都可以接受正态分布和 β 分布两种假设,但根据接受水平, β 分布的拟合效果较好,从实践方面证明了 β 分布有很强的适应性。

太原粉质粘土不排水强度指标的概率分布密度见表 5,从表 5 可知,除直剪 φ_q 的分布为左偏,其它几个参数的分布都为右偏,且所有分布属平板型峰态。三轴和直剪不排水强度指标内摩擦角和粘聚力的分布形态之间都存在着显著差异,这种差异反映了两类实验手段的差异和两种实验结果的差别。

表 4 强度指标概率分布的拟合优度检验

Table 4 Optimum fit test of probabilistic distribution of strength indexes

检验 统计量	三轴内摩擦角 $\varphi_{\text{un}} / (^\circ)$		三轴粘聚力 $c_{\text{un}} / \text{kPa}$		直剪内摩擦角 $\varphi_{\text{q}} / (^\circ)$		直剪粘聚力 $c_{\text{q}} / \text{kPa}$	
	H ₀ : 正态分布	H ₀ : β 分布	H ₀ : 正态分布	H ₀ : β 分布	H ₀ : 正态分布	H ₀ : β 分布	H ₀ : 正态分布	H ₀ : β 分布
	$\mu = 10.8$ $\sigma = 7.75$	$\alpha = -0.20$ $\beta = 0.78$	$\mu = 48.5$ $\sigma = 31.67$	$\alpha = -0.33$ $\beta = 0.01$	$\mu = 21.05$ $\sigma = 9.27$	$\alpha = -0.03$ $\beta = -0.24$	$\mu = 29.56$ $\sigma = 16.21$	$\alpha = -0.14$ $\beta = 0.46$
χ^2	4.79	3.58	5.20	2.99	5.29	3.68	7.35	2.65
K_{H_0i}	0.61	0.46	0.67	0.38	0.56	0.39	0.77	0.28

表 5 强度指标的概率分布

Table 5 Probabilistic distribution of strength indexes

强度指标	分布	样本容量 N	分布参数 α	分布参数 β	偏度系数 β_1	峰度系数 β_2	概 率 分 布
三轴	$\varphi_{\text{un}} / (^\circ)$	40	-0.20	0.78	0.46	2.49	$f_X(x) = 5.206 \times 10^{-3}(x - 0.6)^{-0.20}(33.6 - x)^{0.78}, 0.6 < x < 33.6$
	$c_{\text{un}} / \text{kPa}$		-0.33	0.01	0.14	1.88	$f_X(x) = 0.0280(x - 5)^{-0.03}(113 - x)^{0.01}, 5 < x < 34.8$
直剪	$\varphi_{\text{q}} / (^\circ)$	52	-0.03	-0.24	0.05	1.79	$f_X(x) = 0.597 \times 10^{-3}(x - 3.3)^{0.03}(34.8 - x)^{-0.24}, 3.3 < x < 34.8$
	$c_{\text{q}} / \text{kPa}$		-0.14	0.46	0.20	1.12	$f_X(x) = 5.098 \times 10^{-3}(x - 6)^{0.14}(69 - x)^{0.46}, 6 < x < 69$

3.3 物理指标与强度指标间的经验关系

分析物理指标与强度指标间的相关性时,选取物理指标有孔隙比 e 、含水率 w 、液限 w_L 、液性指数 I_L 、干密度 ρ_d 。利用最小二乘法原理进行回归分析,成果列于表 6。通过指标间相关性分析,可得如下结论:在影响粉质粘土的强度性能的诸要素当中,含水率 w 和孔隙比 e 的影响比较明显。

表 6 物理指标与强度指标间的经验公式

Table 6 Empirical equations between physical and strength indexes

编号	经验公式	样本容量	自变量平均值	因变量平均值	相关系数
1	$\varphi_{\text{un}} = -38.864 + 30.869\rho_d$	40	1.546	9.064	0.657
2	$\varphi_{\text{un}} = 33.786 - 0.945w$	40	25.923	9.283	-0.757
3	$\varphi_{\text{un}} = 31.799 - 29.227e$	40	0.769	9.314	-0.664
4	$\varphi_{\text{un}} = 16.233 - 11.655I_L$	40	0.593	9.319	-0.631
5	$c_{\text{un}} = 127.648 - 3.219w$	40	25.918	44.233	-0.412
6	$c_{\text{un}} = 164.939 - 150.837e$	40	0.769	48.885	-0.532
7	$\varphi_{\text{q}} = -68.803 + 62.605\rho_d$	20	1.516	26.075	0.829
8	$\varphi_{\text{q}} = 59.222 - 1.138w$	20	29.13	26.075	-0.859
9	$\varphi_{\text{q}} = 65.405 - 49.043e$	20	0.802	26.275	-0.836
10	$\varphi_{\text{q}} = 37.284 - 13.159I_L$	20	0.864	25.915	-0.600
11	$c_{\text{q}} = 117.252 - 2.856w$	20	29.955	31.700	-0.783
12	$c_{\text{q}} = 119.619 - 108.697e$	20	0.802	32.450	-0.659

土的抗剪强度实质上是土粒间各种作用力的综合体现,它与土体性质和状态密切相关。随着土体压密,孔隙比 e 变小,含水率 w 降低,土粒周围的结合水膜厚度变薄,土粒间距缩小,这时通过公共结合水膜的水胶连接就逐渐增加,粒间相互作用力随之增大,土体的抗剪强度随着增长。因此,抗剪强度指标与含水率 w 、孔隙比 e 成负的相关性。

3.4 内摩擦角与粘聚力的相关性

本文对 16 个工程不排水强度指标,进行内摩擦角与粘聚力相关性统计分析,其结果如表 7 所示。土的内摩擦角和粘聚力指标间存在着较强的负的相关性,在进行可靠性分析时必须考虑它们之间的相关性影响。

表 7 内摩擦角与粘聚力的经验公式

Table 7 Empirical equations between angle of internal friction and cohesion

编号	经验公式	样本容量	自变量平均值	因变量平均值	相关系数
1	$c_{\text{un}} = 109.99 - 4.36\varphi_{\text{un}}$	40	10.5	64.2	-0.758
2	$c_{\text{q}} = 48.12 - 1.14\varphi_{\text{q}}$	52	20.9	24.4	-0.720

4 实验研究

统计分析发现:三轴和直剪实验结果间存在着显著差异,定性地得出了它们之间的关系。本文进行了大量的室内和现场实验,定量研究三轴和直剪指标之间的相关性,探求土体抗剪强度指标的真实值。

4.1 实验介绍

(1) 未预固结和预固结的不排水三轴对比实验,总计 30 组,目的是研究目前太原粉质粘土强度指标和试样的质量。其实验成果见表 8。

(2) 现场水平推剪和不排水抗剪强度对比实验,总计 10 组,目的是探求太原粉质粘土抗剪强度指标的真值,了解各种指标的精确度。现场所采用的实验是水平推剪实验^[3]。其实验成果见表 9。

(3) 三轴不固结不排水和固结不排水、直剪快剪和固结快剪四类室内强度试验,总计 15 组,目的是定量地研究室内各指标间的相关性。其成果见表 10。

表 8 未预固结和预固结的不排水三轴实验结果对比
Table 8 Comparison of preconsolidated and unpreconsolidated undrained triaxial compression test

编号	未预固结		预固结	
	$\varphi_{\text{un}}/(^{\circ})$	c_{un}/kPa	$\varphi_{\text{un}}/(^{\circ})$	c_{un}/kPa
1	4.5	25.3	7.6	28.5
2	6.7	58.4	9.3	53.7
3	9.6	43.5	8.6	45.0
4	10.2	52.1	12.7	58.1
5	2.0	69.8	6.0	60.0
6	3.6	40.3	6.4	38.4
7	15.0	25.7	15.9	28.5
8	5.5	35.6	6.1	36.3
9	20.0	10.5	16.0	20.0
10	9.2	33.3	9.4	33.5
11	16.5	15.6	14.2	20.6
12	10.5	24.1	14.5	23.9
13	14.7	39.6	15.3	42.8
14	10.2	49.1	15.2	50.6
15	13.5	28.7	14.8	25.7
16	5.2	34.5	6.9	38.5
17	2.9	68.9	6.6	59.6
18	9.9	53.5	9.5	55.3
19	3.7	39.5	7.7	33.8
20	8.3	47.3	7.5	50.1
21	10.6	50.3	14.8	50.9
22	15.4	15.9	13.9	25.6
23	18.9	13.6	15.2	27.5
24	8.5	35.8	7.4	30.9
25	10.4	48.5	13.1	50.7
26	13.5	17.3	15.4	20.5
27	12.7	35.5	15.6	35.8
28	12.5	30.6	14.3	29.6
29	15.9	19.8	15.7	20.2
30	5.6	30.4	7.2	38.9

表 9 水平推剪和不排水强度实验结果对比
Table 9 Comparison between results of horizontal push shear and undrained shear tests

试验 编号	水平推剪试验		三轴不排水试验		直剪快剪试验	
	$\varphi/(^{\circ})$	c/kPa	$\varphi_{\text{un}}/(^{\circ})$	c_{un}/kPa	$\varphi_{\text{q}}/(^{\circ})$	c_{q}/kPa
1	7.5	44.2	6.8	42.9	9.3	38.2
2	8.6	40.6	9.5	43.5	11.2	33.1
3	9.3	41.8	10.2	39.6	12.8	33.6
4	10.1	40.2	11.5	37.3	13.1	44.9
5	13.3	38.7	14.6	40.3	14.6	31.5
6	10.6	37.3	11.5	35.6	14.1	40.1
7	14.8	18.1	14.1	15.2	12.8	20.8
8	13.1	30.8	12.2	33.3	15.9	25.9
9	14.9	34.6	13.5	39.6	12.5	29.1
10	13.5	43.2	12.2	45.1	13.2	35.5

表 10 室内三轴和直剪强度指标实验结果
Table 10 Results of triaxial compression and direct shear tests

编 号	三 轴 试 验				直 剪 试 验			
	$\varphi_{\text{un}}/(^{\circ})$	c_{un}/kPa	$\varphi_{\text{cu}}/(^{\circ})$	c_{cu}/kPa	$\varphi_{\text{q}}/(^{\circ})$	c_{q}/kPa	$\varphi_{\text{cq}}/(^{\circ})$	c_{cq}/kPa
1	16.0	25.3	7.1	40.1	8.2	32.2	6.2	35.1
2	6.5	58.4	8.2	60.2	10.5	40.2	16.3	60.3
3	9.6	43.5	18.1	60.4	15.2	30.1	15.2	32.6
4	10.7	52.1	11.5	70.6	12.8	35.6	22.6	55.6
5	6.5	60.0	8.3	80.5	8.1	49.3	9.1	75.2
6	6.9	40.3	10.1	45.1	13.6	23.5	15.4	29.8
7	16.0	25.7	20.6	45.3	24.5	17.6	35.6	25.7
8	7.5	35.6	15.7	36.3	15.1	40.1	25.1	45.7
9	12.1	20.2	19.3	28.3	16.8	19.8	16.2	22.6
10	9.2	33.3	19.5	53.2	18.1	20.6	18.2	35.3
11	15.8	21.6	26.4	16.1	20.3	16.3	30.8	30.4
12	14.9	24.1	22.5	30.4	23.1	23.7	31.7	41.5
13	15.7	49.6	25.1	63.1	26.2	19.1	25.4	31.2
14	13.5	49.1	19.1	53.5	16.2	30.5	23.5	51.2
15	15.8	28.7	23.7	30.1	25.0	10.2	30.4	19.5

4.2 实验成果分析

(1)由表 8 可以知道, 未预固结的强度指标范围值, φ_{un} : 2. 0°~ 20. 0°, c_{un} : 10. 2~ 69. 8 kPa; 预固结的强度指标范围值, φ_{un} : 6. 0°~ 16. 0°, c_{un} : 20~ 60 kPa。显然, 对试样进行预固结可以减少取样扰动性对强度指标的影响, 改善强度指标的稳定性。因此为了得到比较可靠的粉质粘土强度指标, 建议太原地区的地方规范应该规定: 在进行三轴试验时对试样应该进行预固结。

(2)现场强度实验试样的受剪面积比室内实验试样的受剪面积要大, 而且较室内实验更能符合天然状态, 因此现场强度指标最为可靠。由表 9 可知, 三轴指标比直剪指标相对于现场水平推剪指标的误差较小, 反映了三轴指标与现场水平推剪指标有较好的一致性。

(3)由表 10 可知, 各指标之间有良好的线性相关性。对同一试样, 直剪试验指标 φ_{q} 比三轴试验指标 φ_{un} 普遍偏大, 而直剪试验指标 c_{q} 比三轴试验指标 c_{un} 普遍偏小, 在这方面, 试验结果、统计分析和分布形态所反映的规律是一致的。利用最小二乘法原理可建立回归方程, 其结果列于表 11 中。总之, 粉质粘土室内强度指标之间存在着较好的相关性, 这为处理室内强度实验方法间的差异性指明了方向。本文建议岩土工程中应该多提倡使用三轴强度指标, 当使用直剪指标时应该对照三轴指标对其作适当修正。在修正时, 表 11 中的经验公式可供参考。

表 11 强度指标不同试验方法间的经验公式

Table 11 Empirical equations between strength indexes of different tests

编号	经验公式	样本容量	自变量量子样平均值	因变量量子样平均值	相关系数
1	$\varphi_{\text{uu}} = 1.015 + 0.597 \varphi_{\text{q}}$	15	16.91	11.11	0.868
2	$c_{\text{uu}} = 14.538 + 0.855 c_{\text{q}}$	15	25.25	37.83	0.720
3	$\varphi_{\text{cu}} = 4.577 + 0.580 \varphi_{\text{cq}}$	15	21.45	17.01	0.729
4	$c_{\text{cu}} = 17.673 + 0.762 c_{\text{cq}}$	15	39.45	47.25	0.658

5 强度指标测定方法的不确定性研究

根据文献[4],地基土抗剪强度指标测定方法的不确定性可用公式

$$\eta = \frac{M}{Y} \quad (1)$$

来研究,其中 η 为描述测定方法不确定性的随机因子; Y 为某一测定方法测定值; M 为原型试验测定值,文中为水平推剪试验的测定指标。

5.1 试验介绍

(1)第一组:太原粉质粘土现场水平推剪和室内不排水抗剪强度试验,总计10组,目的是研究地基土不排水强度指标的三轴和直剪测定方法的不确定性,其试验成果见表9。

(2)第二组:太原粉质粘土现场水平推剪和室内固结不排水抗剪强度试验,总计10组,目的是与第一组试验进行对比,研究排水条件对三轴和直剪测定方法的不确定性影响,其试验成果见表12。

表 12 水平推剪和固结不排水抗剪强度试验成果

Table 12 Results of horizontal push shear and consolidated undrained shear tests

编号	水平推剪试验		三轴试验		直剪试验	
	$\varphi/(^{\circ})$	c/kPa	$\varphi_{\text{cu}}/(^{\circ})$	c_{cu}/kPa	$\varphi_{\text{cq}}/(^{\circ})$	c_{cq}/kPa
1	11.2	59.5	10.10	55.7	16.2	50.2
2	13.3	40.5	12.5	42.6	18.5	38.7
3	14.5	36.2	15.8	31.1	19.8	28.4
4	13.6	42.4	15.7	38.3	18.5	30.3
5	15.7	32.6	13.9	35.6	17.2	26.2
6	16.8	35.3	15.2	39.6	15.0	33.2
7	15.2	33.1	15.7	31.7	14.3	35.5
8	18.1	30.2	19.3	29.3	18.0	30.1
9	19.2	26.1	17.6	29.4	18.4	27.6
10	18.7	28.7	19.5	26.9	17.2	27.1

5.2 试验成果分析

利用公式(1)分析表9和表12中试验成果,可获得各测定方法不确定性因子 η 的概率特征值,列于表13。表中 η 的下标代表测定方法的排水条件,上标代表指标的类型。

(1)太原粉质粘土的三轴试验方法的 η 均值约为1.0,可认为是对指标真值的无偏估计,标准差小于0.10,所测的指标比较可靠。

(2)分析直剪测定方法的不确定性因子 η 可知内摩擦角 η 的均值小于1.0,是对指标真值的正偏估计,而粘聚力 η 的均值大于1.0,是对指标真值的负偏估计;直剪测定方法 η 的标准差都大于三轴的,因此三轴测定值精度较高,这与实际情况一致。

(3)第一组和第二组相对应的 η 概率特征值基本一致,说明排水条件对 η 的影响并不明显。

表 13 测定方法不确定性因子的概率特征

Table 13 Probabilistic characteristics of uncertain factor for different test method

土类	因子	排水条件	均值	标准差
太原粉质粘土	$\eta_{\text{uu}}^{\varphi}$	不	0.997	0.098
	η_{uu}^c	排	1.005	0.093
	$\eta_{\text{q}}^{\varphi}$	水	0.893	0.172
	η_{q}^c		1.115	0.152
	$\eta_{\text{cu}}^{\varphi}$	固结	1.015	0.095
	η_{cu}^c	不	1.013	0.096
	$\eta_{\text{cq}}^{\varphi}$	排	0.910	0.173
	η_{cq}^c	水	1.115	0.154

6 结 语

本文比较全面地统计分析了太原粉质粘土抗剪强度指标的空间概率特征,得出了许多经验公式,对选址勘察、建筑场地的可行性研究具有重要的参考价值,可供总结地区性的经验公式参考。

本文统计分析和实验研究发现了太原粉质粘土强度指标不同实验方法的差异性和相关性。通过对强度指标的测定方法的不确定性研究,得出不确定性因子 η 是一个能够综合评价土性指标不确定性的指标。希望本文研究成果能给《建筑地基基础设计规范》(GBJ7—89)的修订和太原地方规范的制定提供一些太原地区资料,并能推动太原地区的岩土工程可靠性研究。

参考文献:

- [1] Vanmarcke E H. Probabilistic modeling of soil profiles[J]. J Geotech Engrg ASCE, 1977, **103**(11): 1227~ 1246.
- [2] 张博庭.用有限比较法进行拟合优度检验[J].岩土工程学报,1991, **13**(6): 84~ 91.
- [3] 工程地质手册编委会.工程地质手册(第三版)[M].北京:中国建筑工业出版社,1992.290~ 292.
- [4] Ronold K O, Bjerager P. Model uncertainty representation in geotechnical reliability analysis[J]. J Geotech Engrg ASCE, 1992, **118**(3): 394~ 405.