

软土卸荷强度试验方法探讨及试验研究

周秋娟

(广东水利电力职业技术学院 市政工程系, 广州 510635)

摘要:通过不同固结、剪切路径,对广州典型软土进行了卸荷抗剪强度试验,试验结果显示,不同的试验方法得到不同抗剪强度参数。不同试验方式下,土样卸荷后的抗剪强度指标都低于加荷下的抗剪强度指标;对基坑工程而言,采用DCU(侧向卸荷三轴试验)更符合实际情况,鉴于该试验方法较难,可采用DGK(先预压固结后卸荷至不同固结压力再进行快剪试验)得到的指标来代替。试验结果还表明:卸荷状态下土体应力应变曲线仍为双曲线形式,且曲线为加工硬化型;在相同的围压下,卸荷强度小于加荷强度;初始切线卸荷模量小于初始切线加荷模量,即用加荷下的加荷模量来代替卸荷下的卸荷模量将会使得工程偏于危险。

关键词:软土;卸荷强度;卸荷模量

中图分类号:TU 443

文献标志码:A

文章编号:1001-5485(2013)03-0035-05

在岩土工程中,土体的变形和强度特性关系到工程的稳定与安全性问题,是学者的研究重点。目前,针对加荷下土体的变形与强度特性研究颇为成熟^[1-3],而对开挖卸荷下土体的变形与强度特性研究的稍为欠缺^[4-5],尤其是针对软土。随着沿海沿江城市的发展,软土开挖卸荷工程(如深基坑、地铁隧道等)逐渐增多,用常规的土工加荷试验得到的土工参数进行开挖工程的数值模拟已越来越不能满足工程的需要,因此本文根据现有的研究现状与实际工程的需要进行了软土的卸荷变形、强度特性研究,重点探讨了软土的卸荷强度及卸荷模量。

1 土体卸荷强度试验方法探讨

根据文献资料^[4-9],土体的卸荷强度试验大致有3种方法,下面进行简单介绍并分析:

(1) 三轴轴向卸载(拉伸)试验^[5-7],得到结论为:轴向卸载时的抗剪强度要比轴向加载时(常规三轴剪切试验)的抗剪强度小,但是卸载下的强度参数 c 和 φ 比加载下的 c 和 φ 值稍大些,学者的解释是橡皮膜的作用。该试验在轴向卸载时,对土体进行了拉伸,使轴向应力小于侧向应力,这使得土体的大小主应力方向发生了改变,在这种情况下,用常规方法求 c 和 φ 值是有不妥之处的;且在实际工程中,土体是不允许承受拉力的,因此在研究卸荷土体的强度上该试验有欠缺之处。

(2) 预压卸荷后直接剪切试验^[8-9],得到结论为:在相同的竖向荷载下,土样卸荷后的强度大于常规加荷下的强度。该试验通常是先对土样进行预压,然后逐级卸荷后再进行剪切。显然,由于土样受到的历史最大荷载大于剪切时的荷载,此时土体强度势必会大于常规加荷下同等竖向荷载时的强度。因此,该试验得到的强度不能与常规直剪强度进行比较,但在卸荷后土体的强度特性研究上是比较合理的。

(3) 三轴侧向卸荷剪切试验^[4],得到的结论为:三轴侧向卸荷剪切试验得到的强度小于常规三轴剪切试验下的强度,但强度参数大致相同。由于在数值计算中一般采用的是强度参数,实际工程中卸荷后土体的强度将减小,因此该试验获得的强度参数在实际应用中不合理之处,但在分析侧向卸荷后土体的强度变化上是可取的。

以上土体卸荷强度试验得到的抗剪强度参数与常规加荷下得到强度参数进行比较时均有不足之处,主要原因是2种试验的剪切方法不同或是试验的起点不同。本文综合前人的研究,考虑土体的初始固结状态以及卸荷过程,重新设计了土体卸荷强度试验:先对土体进行 k_0 固结,然后沿固结路径进行卸荷,卸荷完成后再进行常规三轴剪切试验;而与之对比的加荷强度试验则先对土体进行 k_0 固结,然后进行常规三轴剪切试验。

2 基本试验方案

通过对软土卸荷抗剪强度试验方法的探讨,本文采用广东典型原状饱和软土,进行了不同卸荷方法下的卸荷强度试验。土样的物理指标如表 1 所示,具体的试验方案如表 2 所示,应力路径如图 1 所示。

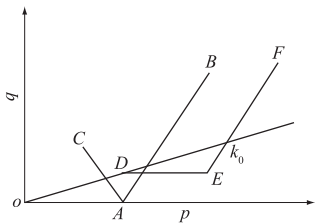


图 1 应力路径示意图
Fig.1 Schematic of stress paths

3 试验成果分析

3.1 卸荷抗剪强度指标

通过不同卸荷抗剪强度试验得到不同卸荷抗剪强度指标如图 2 所示,并将强度指标汇总于表 3。

从表 3 可以看出试验方法对抗剪强度指标有较大影响。将 ICU 与 DCU,IKCU 与 DKCU,IGK 与

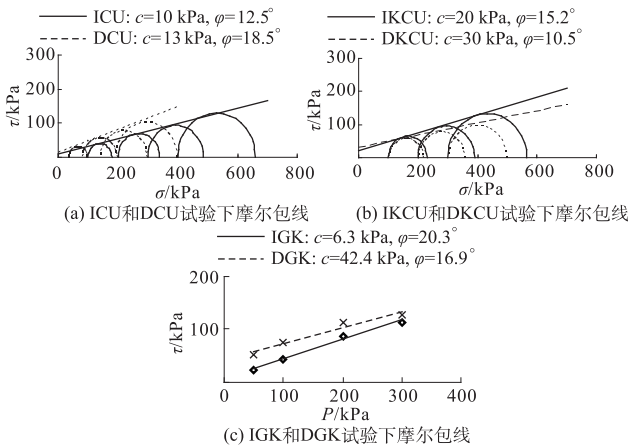


图 2 不同试验方法得到的摩尔包线
Fig.2 Mohr's envelopes obtained from different tests

DGK 进行比较可知,相同的试验模式下,卸荷下的内摩擦角及有效内摩擦角均小于加荷下的内摩擦角及有效内摩擦角,除 ICU 与 DCU 的内摩擦角情况例外。这是由于 DCU 是侧向卸荷,莫尔圆是往原点方向移动的,因此使得虽然卸荷下的抗剪强度较小,反而得到的强度指标较大;但由于卸荷产生负孔压,这又使得卸荷下的有效抗剪强度指标小于加荷下的有效抗剪强度指标,这与实际工程中卸荷下土体的稳

表 1 土样的物理力学性质指标

Table 1 Physical and mechanical properties of soil sample

含水量 $w/\%$	密度 $\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	孔隙比 e_0	塑限 $w_p/\%$	液限 $w_L/\%$	塑限指数 I_p	液限指数 I_L	压缩模量 $C_e(100 \sim 200)$
73.3	1.56	2.2	28.5	58.4	29.9	1.5	0.508 3

表 2 软土卸荷抗剪强度试验方案

Table 2 Schemes of test on the unloading shear strength of soft soil

试验方法	试验编号	K_0 固结		固结过程		剪切过程(不排水)			应力路径 (图 1 所示)
		σ_3/kPa	固结路径 $K_0 = \sigma_3/\sigma_1$	σ_3/kPa	$q = (\sigma_1 - \sigma_3)/\text{kPa}$	控制方式	剪切路径	剪切速率	
ICU	ICU100	—	—	100	0	应变控制	σ_3 不变、 σ_1 增大	$v = 0.06 \text{ mm/min}$	O→A→B
	ICU200			200					
	ICU300			300					
	ICU400			400					
DCU	DCU100	—	—	100	0	应力控制	σ_3 减少、 σ_1 不变	$\Delta q = 0.02 \text{ kPa/min}$	O→A→C
	DCU150			150					
	DCU200			200					
	DCU300			300					
IKCU	IKCU100	100	0.7	100	43	应变控制	σ_3 不变、 σ_1 增大	$v = 0.06 \text{ mm/min}$	O→D→E→F
	IKCU200			200					
	IKCU300			300					
DKCU	DKCU100	100	0.7	100	43	应变控制	σ_3 不变、 σ_1 增大	$v = 0.06 \text{ mm/min}$	O→D→O→A→B
	DKCU200			200					
	DKCU300			300					
IGK	IGK50	—	—	50	—	应变控制	—	$v = 0.06 \text{ mm/min}$	—
	IGK100			100					
	IGK200			200					
	IGK300			300					
DGK	DGK50	预压固结压力 为 400 kPa	—	50	—	应变控制	—	$v = 0.06 \text{ mm/min}$	—
	DGK100			100					
	DGK200			200					
	DGK300			300					

注: ICU 表示常规三轴剪切试验;DCU 表示卸荷压三轴剪切试验;IKCU 表示 K_0 固结后再进行常规三轴剪切试验;DKCU 表示 K_0 固结后卸荷再进行常规三轴剪切试验;IGK 表示固结快剪试验;DGK 表示先预压固结后卸荷至不同固结压力再进行快剪试验。

表 3 不同试验方法下的抗剪强度指标						
Table 3 Shear strength parameters in different tests						
试验方法	固结压力/kPa	峰值强度/kPa	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	有效黏聚力 c'/kPa	有效内摩擦角 $\varphi'/(^{\circ})$
ICU	100	89.1	10.0	12.5	3	24.9
	200	130.0				
	300	187.4				
	400	306.0				
DCU	100	66.8	13.0	18.5	5	16.7
	200	113.7				
	300	159.8				
	400	207.4				
IKCU	100	131.5	20.0	15.2	38	28.8
	200	170.2				
	300	247.3				
DKCU	100	124.1	30.0	10.5	47	14.4
	200	165.7				
	300	203.3				
IGK	50	22.4	6.3	20.3	—	—
	100	43.6				
	200	85.8				
	300	113.9				
DGK	50	52.3	42.4	16.9	—	—
	100	74.9				
	200	112.6				
	300	127.8				

定性较差相一致。因此,在工程实践中,卸荷开挖采用加荷(ICU,IKCU,IGK)下的强度指标进行稳定分析将使得工程偏于不安全。

进一步比较 3 种不同卸荷(DCU,DKCU,DGK)方式下的强度指标可以发现, $\varphi_{(DKCU)} < \varphi_{(DGK)} < \varphi_{(DCU)}$ 。实际基坑开挖工程中,DCU 的试验方式更符合实际工程,但 DCU 试验需采用应力控制式三轴仪,对仪器要求较高,且试验过程较为复杂、难度较高,而相同固结压力下 DKCU 试验得到的峰值强度较大,因此,采用 DGK 代替 DCU 得到抗剪强度指标较为合适,且 DGK 试验也较为简单。

此外,相同的试验模式下,卸荷下的黏聚力小于加荷下的黏聚力,这主要是由于卸荷土体类似于超固结土,因此黏聚力大于正常固结土。

3.2 应力应变曲线

图 3 为不同试验方法下的应力应变曲线。从图中可以看出,不论是何种试验方法,变形曲线均为加工硬化型。加卸荷下应力应变曲线受试验方法的不同而不同,但是不论试验方式如何改变,土体的应力应变关系曲线均为双曲线形式。从图中还可以看出在相同的围压下,卸荷下的强度比相应加荷下的强度小。

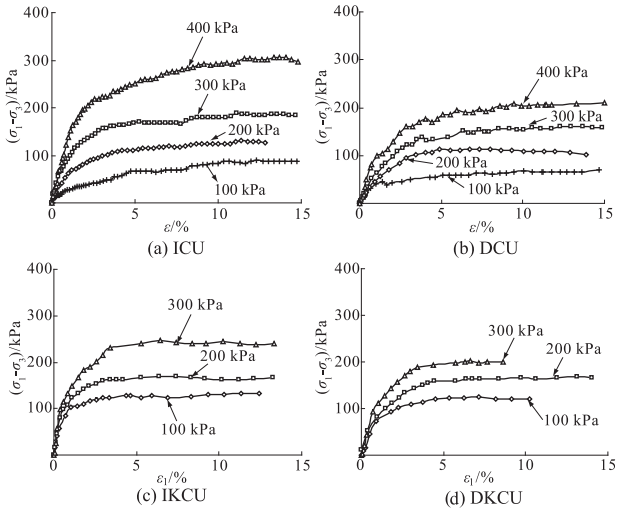


图 3 应力应变曲线
Fig. 3 Stress-strain curves

3.3 初始切线加/卸荷模量

在数值计算中,加/卸荷模量是土体本构模型参数中的重要参数,部分学者对此进行了相关研究^[4,10-11]。表 4 给出了本文得到的不同加/卸荷强度试验下初始切线加/卸荷模量,将其汇成图 4 所示。从图 4 中可以看出,初始加/卸荷模量与平均固结压力成线性关系,图中给出了相应的关系式。

表 4 初始切线加/卸荷模量成果表

Table 4 Results of initial tangential loading/unloading modulus				
σ_m/kPa	ICU	DCU	IKCU	DKCU
	E_i/MPa	E_{ui}/MPa	E_i/MPa	E_{ui}/MPa
100	5.00	4.74	28.57	19.28
200	10.75	8.00	33.33	23.20
300	16.23	11.36	40.00	28.39
400	21.28	15.63		

注: σ_m 为平均固结压力, $\sigma_m = (2\sigma_3 + \sigma_1)/3$; E_i 为初始切线加荷模量; E_{ui} 为初始切线卸荷模量。

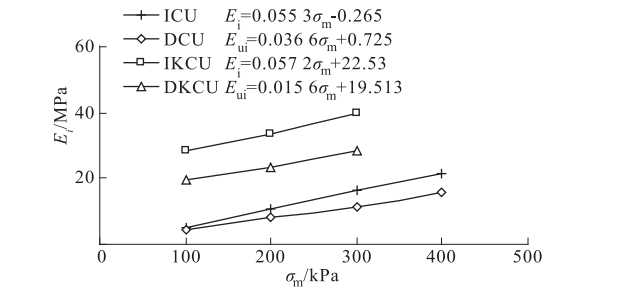


图 4 初始加/卸荷模量与平均固结压力关系曲线
Fig. 4 Curves of initial loading/unloading modulus versus average consolidation pressure

从表 4 中可以看出, $E_{ui(DCU)} < E_{ui(ICU)}$, $E_{ui(DKCU)} < E_{ui(IKCU)}$,说明在相同的荷载增/减量下,软土卸荷变形将大于加荷变形,使土体在卸荷下强度变小,更容易受到破坏,这与实际工程中软土在不排水情况下进行开挖卸荷时很容易发生滑坡、破坏等现象相符。同

时也指出,用加荷下的加荷模量来代替卸荷下的卸荷模量将会使得工程偏于危险。

4 结 论

(1) 不同试验方式下,土样卸荷后的抗剪强度指标都低于加荷下的抗剪强度指标;对基坑工程而言,采用 DCU(侧向卸荷三轴试验)更符合实际情况,鉴于该试验方法较难,可采用 DGK(先预压固结后卸荷至不同固结压力再进行快剪试验)得到的指标来代替。

(2) 卸荷状态下土体应力应变曲线仍为双曲线形式,且曲线为加工硬化型;在相同的围压下,卸荷强度小于加荷强度。

(3) 初始切线卸荷模量小于初始切线加荷模量,即用加荷下的加荷模量来代替卸荷下的卸荷模量将会使得工程偏于危险。

参考文献:

- [1] 周秋娟,陈晓平. 软土次固结特性试验研究[J]. 岩土力学,2006,27(3):404-408. (ZHOU Qiu-juan, CHEN Xiao-ping. Test Study on Properties of Secondary Consolidation of Soft Soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(3):404-408. (in Chinese))
- [2] 王 军,高玉峰. 加荷比对结构性软土沉降特性的影响[J]. 岩土力学,2007,28(12):2614-2618. (WANG Jun,GAO Yu-feng. Effect of Loading Ratio to Structured Soft Clay Settlement [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007,28(12):2614-2618. (in Chinese))
- [3] 邓永锋,刘松玉. 扰动对软土强度影响规律研究[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(9):1940-1944. (DENG Yong-feng, LIU Song-yu. Effect of Sample Disturbance on Soft Soil Strength[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(9): 1940-1944. (in Chinese))
- [4] 宰金珉,张云军,王旭东,等. 卸荷状态下黏性土的变形和强度试验研究[J]. 岩土工程学报,2007,29(9):1409-1412. (ZAI Jin-min, ZHANG Yun-jun, WANG Xu-dong, et al. Experiment Research on Deformation and Strength of Cohesive Soil under Lateral Extension[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 29(9):1409-1412. (in Chinese))
- [5] 刘国彬,侯学渊. 软土的卸荷应力-应变特性[J]. 地下工程与隧道,1997,(2):16-23. (LIU Guo-bin, HOU Xue-yuan. Unloading Stress-Strain Characteristic for Soft Soil[J]. Underground Engineering and Tunnels, 1997, (2):16-23. (in Chinese))
- [6] 魏汝龙. 正常压密黏性土在开挖卸荷后的不排水抗剪强度[J]. 水利水运科学研究,1984,6(4):39-43. (WEI Ru-long. The Undrained Shear Strength of Normal Consolidated Clay During Unloading Due to Excavation [J]. Hydro Science and Engineering, 1984, 6(4): 39-43. (in Chinese))
- [7] 陈永福,曹名葆. 上海地区软黏土的卸荷-再加荷变形特性[J]. 岩土工程学报,1990,12(2):9-18. (CHEN Yong-fu, CAO Ming-bao. The Deformation Characteristics of Soft Clay under Unloading and Reloading in Shanghai[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1990, 12(2): 9-18. (in Chinese))
- [8] 程玉梅. 卸荷状态下土工程性质变化机理探讨及试验研究[D]. 上海:同济大学,1999. (CHENG Yu-mei. Mechanism of the Variation of Engineering Properties of Soil under the Unloading Condition[D]. Shanghai: Tongji University,1999. (in Chinese))
- [9] 秦爱芳,刘绍峰,胡中雄. 基坑软土强度变化特征及坑底施工安全控制[J]. 地下空间,2003,23(1):40-44. (QIN Ai-fang, LIU Shao-feng, HU Zhong-xiong. Analysis on Strength Change of Soil Body of Soft Clay Pit and Safety Control for the Pit Bottom Construction[J]. Underground Space, 2003,23(1):40-44. (in Chinese))
- [10] 刘国彬,侯学渊. 软土的卸荷模量[J]. 岩土工程学报,1996,18(6):18-23. (LIU Guo-bin, HOU Xue-yuan. Unloading Modulus of the Shanghai Soft Clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 18(6): 18-23. (in Chinese))
- [11] 张小平,张青林,包承纲,等. 卸荷模量取值的研究[J]. 岩土力学. 2002,23(1):27-30. (ZHANG Xiao-ping, ZHANG Qing-lin, BAO Cheng-gang, et al. Study on Parameter of Unloading Modulus [J]. Rock and Soil Mechanics, 2002,23(1):27-30. (in Chinese))

(编辑:曾小汉)

Tests and Test Methods of Unloading Strength of Soft Soil

ZHOU Qiu-juan

(Department of Municipal Engineering, Guangdong Technical College of Water Resources and Electric Engineering, Guangzhou 510635, China)

Abstract: Through different consolidation and shearing paths, unloading shear strength tests were carried out on typical Guangzhou soft soil. Different shear strengths were obtained through different test methods. The unloading

shear strength parameters were lower than loading shear strength parameters. For foundation pit engineering, the DCU (lateral unloading triaxial test) is suitable for the actual situation. Nevertheless owing to its difficulty, the DGK (preloading consolidation, followed by unloading to different consolidation pressures, and quick shear test in subsequence) can be employed instead. The test also showed that the stress-strain curve with work hardening was still hyperbola under unloading condition. Unloading shear strength was smaller than loading shear strength when given the same confining pressure. Initial tangential unloading modulus was smaller than initial tangential loading modulus, therefore, when the loading modulus is used instead of the unloading modulus, the project is prone to be in hazard.

Key words: soft soil; unloading strength; unloading modulus

(上接第 29 页)

[13] 翟所业, 贺宪国. 巷道围岩塑性区的德鲁克-普拉格准则解[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(2): 223 - 226. (ZHAI Suo-ye, HE Xian-guo. Solution of D-P Criterion of Plastic District of Surrounding Rock of Roadway [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005, 1(2): 223 - 226. (in Chinese))

[14] 荣传新, 程桦. 地下水渗流对巷道围岩稳定性影响的理论解[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(5): 741 - 744. (RONG Chuan-xin, CHENG Hua. Stability Analysis of Rocks around Tunnel with Groundwater Permeation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(5): 741 - 744. (in Chinese))

[15] 徐芝纶. 弹性力学简明教程[M]. 北京: 高等教育出版社, 1980. (XU Zhi-lun. A Concise Course in Elasticity Theory[M]. Beijing: Higher Education Press, 1980. (in Chinese))

[16] 钱鸣高, 石平五. 矿山压力与岩层控制[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2003. (QIAN Ming-gao, SHI Ping-wu. Ground Control and Rock Pressure[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2003. (in Chinese))

[17] 谭学术, 鲜学福, 郑道访. 复合岩体力学理论及其应用[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1994. (TAN Xue-shu, XIAN Xue-fu, ZHENG Dao-fang. Complex Rock Mechanics Theory and Application[M]. Beijing: Coal Industry Press, 1994. (in Chinese))

(编辑: 姜小兰)

Permeability Coefficient of Damage Zone of Surrounding Rock Based on Drucker-Prager Criterion

SUN Zhen-ping, GAO Zhao-ning, MENG Xiang-rui

(School of Mining and Safety, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: This research is to provide theoretical basis for the deformation calculation and stability analysis of roadway under seepage action. The analytical solution of circular roadway's surrounding rock stress field, and the expression of surrounding rock's permeability coefficient were put forward in consideration of intermediate principal stress based on Drucker-Prager criterion and Damage Mechanics. Moreover, the relation of permeability coefficient K vs. pore water pressure p , and K vs. radius r of surrounding rock's plastic zone were obtained. Results showed that within the damage area, permeability coefficient K decreased nonlinearly with the increase of r , while increased exponentially with the rise of pore water pressure p .

Key words: Drucker-Prager criterion; damage variable; intermediate principal stress; permeability coefficient; pore water pressure