

文章编号:1007-2993(2009)03-0119-03

砂土与钢材接触面剪切特性试验对比研究

杨大方 刘希亮 何 军

(河南理工大学土木工程学院,河南焦作 454003)

【摘 要】 为了研究砂土与钢材接触界面剪切特性,对原有的及改装后的 DSJ-2 型电动四联等应变直剪仪上分别进行了砂土同钢材界面的单剪试验和直剪试验,并做了对比分析。研究结果表明:1)单剪试验下在法向应力 50 kPa、100 kPa 时,砂土与钢材界面的剪应力-剪切位移关系曲线呈非线性弹性理想塑性关系,在法向应力 200 kPa、400 kPa 时呈刚塑性关系。直剪试验下在法向应力 50 kPa、100 kPa 时,砂土与钢材界面的剪应力-剪切位移关系曲线呈非线性关系,在法向应力 200 kPa、400 kPa 时呈双曲线关系;2)提出了界面抗剪强度指标的经验换算公式(直剪试验下得到的界面抗剪强度指标乘以一个小于 1 的系数),以修正应用于设计的直剪试验结果。

【关键词】 接触面;剪切特性;单剪试验;直剪试验

【中图分类号】 TU 411

【文献标识码】 A

doi:10.3969/j.issn.1007-2993.2009.03.003

Comparative Study of Shear Test Between Sand and Steel

Yang Dafang Liu Xiliang He Jun

(School of Civil Engineering College, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, Henan, China)

【Abstract】 In order to study the shear properties of the interface between the sand and steel, the result of a series simple shear test and direct shear test of interface between dry, saturated sand and smooth, rough steel on the DSJ-2 electric four-joint equal stress direct shear apparatus and after refitted is contrastively analyzed. The result shows that the shear stress-shear displacement curve of interfaces presents misalignment elastic ideal plasticity relations when the vertical stress is 50, 100kPa or presents rigidity-plasticity relations when the vertical stress is 200, 400kPa with the simple shear test, the shear stress-shear displacement curve of interfaces presents misalignment relations when the vertical stress is 50, 100kPa or presents hyperbolic curve relations when the vertical stress is 200, 400kPa with the direct shear test. In addition, the experience reduction formula of contact surface shearing strength target (the interface shear strength index with the direct shear test multiplied by a factor less than 1) are proposed to revise the direct shear test result in design.

【Key words】 interface; shear characteristic; simple shear test; direct shear test

0 引 言

岩土及地下工程中,土体与结构的相互作用问题普遍存在,例如土体与基础、土体与桩、土体与挡土结构等^[1-2]。由于地下水位下降等原因必然导致土体与结构的相对移动,由于两种介质的变形性质差别较大,导致在土体与结构的界面上往往产生较大的剪应力,当二者差异变形较大时,引起结构的破坏,造成巨大的损失。在实际工程中,大多为土体与混凝土结构物的相互作用问题,为此,许多学者对此已做了较深入的研究,但是也不乏存在土与钢材结构物的相互作用问题,比如在边坡工程及深基坑工程中的护坡钢桩(钢管,中

间充填混凝土)等,对此方面的研究却较少,为此本文在改装前及改装后的直剪仪上分别进行了砂土与刚度相对于混凝土较大的钢材界面的单剪和直剪试验,对界面剪切特性进行了试验研究,并对试验结果进行了对比分析,得出了两种试验的规律性差异,在工程设计中意义重大。

1 单剪试验和直剪试验

1.1 试验仪器

本文直剪试验是在河南理工大学现有的 DSJ-2 型电动四联等应变直剪仪上进行。单剪试验是对直剪仪进行改装,即将直剪仪的下盒取出,直接用结构物(钢材)代替。这样可以较好地解决剪切过程

中实际剪切面积不断减小、上下盒边缘处的应力集中明显等问题。

1.2 试样制备及试验方法

砂土选用天然黄沙,按文献[3]的要求配制出砾砂、粗砂、中砂、细砂。砂土饱和时在试样中掺入稍许粘粒,以便饱和。钢材选用商业中碳钢,光滑面采用机器抛光,粗糙面为人工生锈生成。试验方法采用土样面积 30 cm²、高 2 cm,在改装前及改装后的 DSJ-2 型电动四联等应变直剪仪上分别进行砂土与钢材接触界面的单剪试验和直剪试验;具体操作过

程,按照《土工试验规程》(GB/T 50123—1999)^[3]的要求进行。

2 试验结果

本试验中共进行了干燥及饱和的砂土与光滑及粗糙的钢材界面单剪及直剪试验 128 组,本试验数据比较多,考虑到篇幅这里不再一一给出,只给出干燥细砂与钢材界面剪应力与剪切位移的关系曲线,见图 1。为了研究界面剪切破坏准则,按照无粘性土抗剪强度库伦公式对法向应力及其对应的最大剪应力进行回归,回归结果见表 1。

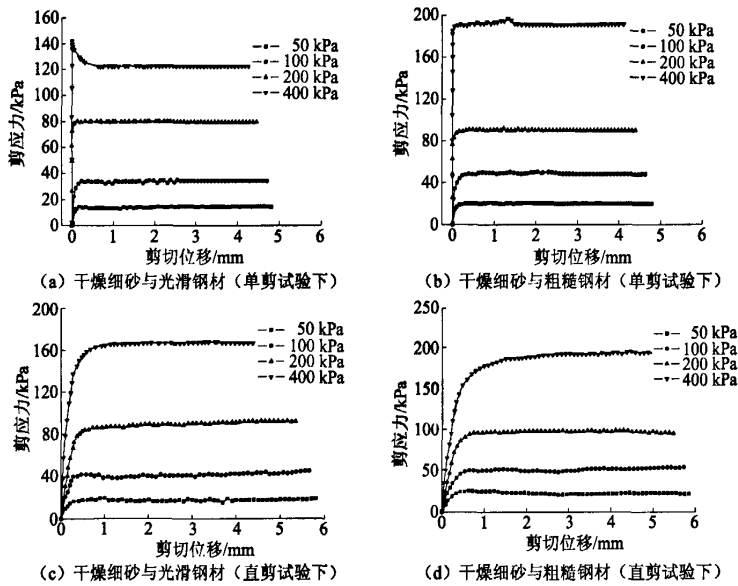


图 1 不同应力水平下干燥细砂与钢材界面剪应力-剪切位移关系曲线

表 1 试验数据线性回归结果

材料特性	界面特性	单剪试验			直剪试验		
		tan δ		相关系数	tan δ		相关系数
		数值	误差		数值	误差	
干燥砂土	砾砂-钢材	0.363 92	0.013 33	0.999 23	0.419 21	0.006 37	0.999 00
	粗砂-钢材	0.366 63	0.012 18	0.997 03	0.441 76	0.014 10	0.999 84
光滑钢材	中砂-钢材	0.350 58	0.007 08	0.998 38	0.433 33	0.014 70	0.999 92
	细砂-钢材	0.363 69	0.012 14	0.995 09	0.413 25	0.006 48	0.999 00
饱和砂土	砾砂-钢材	0.257 67	0.007 26	0.998 23	0.370 41	0.007 63	0.998 29
	粗砂-钢材	0.280 87	0.013 35	0.998 34	0.383 39	0.013 40	0.996 39
光滑钢材	中砂-钢材	0.275 14	0.012 21	0.997 69	0.339 92	0.009 77	0.998 80
	细砂-钢材	0.281 79	0.013 50	0.996 99	0.328 85	0.009 05	0.999 65
干燥砂土	砾砂-钢材	0.396 01	0.013 81	0.994 61	0.464 57	0.011 74	0.998 98
	粗砂-钢材	0.378 79	0.007 40	0.998 37	0.519 48	0.030 95	0.984 37
粗糙钢材	中砂-钢材	0.458 85	0.009 58	0.998 46	0.493 65	0.006 45	0.999 40
	细砂-钢材	0.486 78	0.009 01	0.998 95	0.506 43	0.001 32	0.999 98
饱和砂土	砾砂-钢材	0.392 50	0.007 32	0.999 87	0.412 71	0.009 53	0.997 78
	粗砂-钢材	0.376 76	0.013 06	0.999 06	0.452 95	0.070 00	0.999 09
粗糙钢材	中砂-钢材	0.454 28	0.006 33	0.999 34	0.458 74	0.006 92	0.999 00
	细砂-钢材	0.484 79	0.001 50	0.999 96	0.493 77	0.001 74	0.999 95

3 数据分析

3.1 接触界面剪切本构关系分析

由图 1 可以看出:单剪试验条件下砂土与钢材界面的剪应力-剪切位移关系曲线在法向应力 50 kPa、100 kPa 时呈非线性弹性理想塑性关系,在法向应力 200 kPa、400 kPa 时呈刚塑性关系,即在未达到界面剪应力峰值时无剪切位移的出现,一旦达到界面剪应力峰值后呈塑性流动。砂土与光滑钢材界面存在有明显的残余强度,原因可能是在未达到界面的最大剪应力即界面临界滑动摩擦力时,随着剪切的继续在界面上产生了越来越大的剪应力,当剪应力达到临界滑动摩擦力后,砂土与钢材界面之间的接触关系发生改变,加之钢材表面比较光滑,就好像一有滑动出现剪切力就发生松弛,因而存在明显的剪应力陡降现象。

直剪试验条件下砂土与钢材界面的剪应力-剪切位移关系曲线在法向应力为 50 kPa、100 kPa 下呈非线性分布,有应变硬化现象,当界面剪应力达到峰值强度后,出现塑性流动;在法向应力为 200 kPa、400 kPa 下大致成双曲线分布,有明显的应变硬化现象,无峰值强度。

3.2 接触界面抗剪强度分析

两种试验方法下界面剪应力峰值强度均随着法向应力的增大而增大;直剪试验得到的界面剪应力峰值强度相对大于单剪试验;干燥砂土的剪应力峰值大于饱和砂土,说明砂的含水量对界面抗剪强度有削弱作用;粗糙界面的剪应力峰值强度相对大于光滑界面,原因可能是:粗糙钢材界面粗糙度 $R^{[4]}$ 大于光滑钢材界面粗糙度 R ,更有利于粒径较小的砂与钢材表面的结合,从而提高了接触面界面摩擦系数,使剪应力峰值得到提高。

3.3 界面抗剪强度准则分析

无论是单剪试验还是直剪试验,从表 1 可知:砂土与结构界面最大剪应力同法向应力具有较好的线性关系,采用无粘性土的抗剪强度库仑公式对界面剪应力峰值及其对应的法向应力进行回归,从回归结果来看,相关系数均在 0.98 以上,界面内摩擦角的误差均在 0.03 以下,具有较高的可信度,因此建议采用 $\tau = \sigma \tan \delta$ 的抗剪强度准则作为无粘性土与结构物界面剪切时界面的抗剪强度准则。

3.4 界面内摩擦角分析

单剪直剪试验下界面抗剪强度指标比值见表 2。

表 2 单剪直剪试验下界面内摩擦角比值

接触类型	砂的颗粒	单剪试验		直剪试验		比 值	
		干燥	饱和	干燥	饱和	干燥	饱和
砂与光滑钢材	砾砂	19.9975	14.4491	22.7439	20.3251	0.879247	0.710899
	粗砂	20.1345	15.6885	23.8339	20.9763	0.844784	0.747916
	中砂	19.3196	15.3837	23.4285	18.7739	0.82462	0.81942
砂与粗糙钢材	细沙	19.9858	15.7373	22.4529	18.2035	0.890121	0.864521
	砾砂	21.6041	20.9024	24.9182	22.4264	0.867001	0.932044
	粗砂	20.7462	20.0637	27.451	24.3681	0.755754	0.823359
	中砂	24.6480	24.0842	26.2733	24.6428	0.938139	0.977332
	细沙	26.3036	25.8636	26.859	26.2788	0.979322	0.9842

从试验数据可知:饱和砂土的界面内摩擦角小于干燥砂土,说明无粘性土的含水量对其界面抗剪性能有削弱作用;光滑钢材的界面内摩擦角小于粗糙钢材,这说明界面内摩擦角与基底的粗糙度有关系;对于不同界面情况下界面内摩擦角的变化与砂的粒径没有很好的线性关系,这说明接触界面摩擦系数不但与界面粗糙度 R 有关,与砂土的颗粒级配也有关系,即在砂的粒径和界面粗糙度 R 之间存在一个平衡点,当达到这个平衡点时界面抗剪强度达到最大值;直剪试验下的界面的抗剪强度指标总体上大于单剪试验,因此在工程设计时可以考虑对直剪试验得到的界面抗剪强度指标进行折减,这样就可以仅通过易于操作的直剪试验得到可靠的试验结果(单剪试验过程繁

琐,且费用高,只在少数科研单位使用的单剪仪,在工程单位很少采用),在工程设计中意义重大。

单剪直剪试验下界面内摩擦角间的换算可以采用如下的统计公式

$$\varphi_d = k\varphi_s$$

式中: φ_d 为单剪试验下的界面内摩擦角; φ_s 为直剪试验下的界面内摩擦角; k 为小于 1 的系数,由实验数据统计得到。当结构物为木材时, k 可取 0.95~0.98;当结构物为钢材时, k 可取 0.85~0.90;当结构物为混凝土时, k 可取 0.93~0.97。

4 结论

1) 单剪试验条件下砂土与钢材界面的剪应力-
(下转第 126 页)

- embankments on soft clay[J]. Can Geotech J, 1978, 15(1):255-287.
- [7] 朱梅生. 软土地基[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1989.
- [8] 龚晓南, Gudebus G. 反分析法确定固结过程中土的力学参数[J]. 浙江大学学报, 1989, 23(6):96-104.
- [9] 折学森. 软土地基沉降计算[M]. 北京: 人民交通出版社, 1998.
- [10] 石名磊, 等. 高速公路地基沉降反演分析[J]. 东南大学学报, 2005, 35(4):589-592.
- [11] 施光燕, 董加礼. 最优化方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999.

收稿日期: 2009-03-24

(上接第 121 页)

剪切位移关系曲线为: 法向应力为 50 kPa、100 kPa 时呈非线性理想塑性关系, 法向应力为 200 kPa、400 kPa 时呈刚塑性关系, 因而在考虑界面摩擦模式时可以采用库伦摩擦模式^[5]。直剪试验条件下为: 50 kPa、100 kPa 下呈非线性分布, 当界面剪应力达到峰值强度后, 出现塑性流动, 在法向应力为 200 kPa、400 kPa 下大致成双曲线分布。

2) 两种试验方法下界面剪应力峰值强度均随着法向应力的增大而增大; 直剪试验得到的界面剪应力峰值强度相对大于单剪试验; 干燥砂土的剪应力峰值强度大于饱和砂土; 粗糙界面的剪应力峰值强度相对大于光滑界面。

3) 无论是单剪试验还是直剪试验, 砂土与钢材接触界面最大剪应力随法向应力的增大而增大, 具有较好的线性关系, 建议采用 $t = \sigma \tan \delta$ 的抗剪强度准则作为无粘性土与结构物界面剪切时界面的抗剪强度准则。

4) 饱和砂土的界面内摩擦角小于干燥砂土; 光滑钢材界面的内摩擦角小于粗糙钢材界面; 不同界面情况下界面内摩擦角的变化与砂的粒径没有很好的线性关系, 这说明接触界面摩擦系数不但与界面粗糙度 R 有关, 与砂土的颗粒级配也有关系, 也就是

说在砂的粒径和基底粗糙度 R 之间存在一个平衡点, 当达到这个平衡点时界面抗剪强度达到最大值。

5) 根据单剪与直剪试验结果的对比, 本章提出了界面抗剪强度指标的经验换算公式(直剪试验下得到的界面抗剪强度指标乘以一个小于 1 的系数), 以修正应用于设计的直剪试验结果, 这样就可以仅通过易于操作的直剪试验就可得到可靠的试验结果, 在工程设计中意义重大。

参 考 文 献

- [1] 陈希泽. 土力学地基基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [2] 卢廷浩, 刘祖德, 等. 高等土力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005: 185.
- [3] 中华人民共和国水利部. GB/T 50123—1999 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999: 28-31.
- [4] 张 嘎, 张建民. 粗粒土与结构接触面的静动本构规律[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(5): 516-520.
- [5] 陈慧远. 摩擦接触单元及其分析方法[J]. 水利学报, 1985, 27(4): 44-50.

收稿日期: 2009-03-09