

扰动土-结构接触面抗剪强度特性试验研究^{*}

赵少飞,戴志广,刘鑫,刘欣怡

(华北科技学院 建筑工程学院,北京 101601)

摘 要:针对地下空间开发等原因引起的扰动土-结构接触面抗剪强度特性,制备了干密度、孔隙比、含水率和饱和度4类物理性质指标变化的扰动土样,在传统应变控制直剪仪上通过改进的试验方案,探究扰动土与粗糙、光滑和极光滑3类粗糙度接触面的抗剪强度变化规律。试验结果表明,对各类粗糙度接触面,抗剪强度及外摩擦角,均随含水率、孔隙比、饱和度的增大而非线性减小,而随干密度的增加而非线性增加,其中含水率在10%~15%或饱和度在40%~50%范围时改变显著。对于极光滑接触面,抗剪强度及外摩擦角受土的扰动影响微小,基本可以忽略。试验结果为扰动土-结构接触面抗剪强度规律和扰动土-结构相互作用的进一步研究提供了试验依据。

关键词:扰动土;土-结构接触面;抗剪强度;粗糙度

中图分类号:TU411

文献标识码:A

文章编号:1673-0836(2018)01-0067-05

Experimental Research of Shear Strength Characteristics on Disturbed Soil-structure Interfaces

Zhao Shaofei, Dai Zhiguang, Liu Xin, Liu Xinyi

(Architectural Engineering College, North China Institute of Science and Technology, Beijing 101601, P.R. China)

Abstract: Disturbed soil samples are prepared for simulating physical property variation in dry density, water content, void ratio and degree of saturation caused by construction of underground building. An improved experimental process is presented to study shear strength characteristics on disturbed soil-structure interfaces using a conventional strain-controlled direct shear instrument. Three types of interface roughness are employed which are rough, smooth and extremely smooth to reflect actual surfaces of concrete and steel building materials. Experimental results show that for any types of interface roughness, shear strength, indicating the angles of external friction of disturbed soil-structure interfaces, overall nonlinearly decreases with increases of soil water content, void ratio or degree of saturation, but nonlinearly increases with increase of its dry density. In particular, the shear strength and the angles of external friction vary rapidly for a slight change of water content within the range between 10% and 15% or of degree of saturation within the range between 40% and 50%. However they vary gently with water content or degree of saturation out of the two ranges. For the extremely smooth interface variation of the shear strength may be ignored caused by the changes of disturbed soil property. Experimental results would be fundamental for investigation of the rules of shear strength on disturbed soil-structure interfaces and the disturbed soil-structure interaction.

Keywords: soil-structure interface; disturbed soil; shear strength; roughness

^{*} 收稿日期:2017-08-07(修改稿)

作者简介:赵少飞(1965-),男,河南偃师人,博士,教授,主要从事岩土工程领域的教学与科研工作。

E-mail:zhaoshaofei@126.com

基金项目:中央高校基本科研业务费(3142014019;3142015049)

0 引言

随着地下空间的开发和利用,不可避免地对其周围土层产生扰动,使土的物理力学性质发生变化,土的结构受到一定程度的损伤,进而导致建筑物(构筑物)变形、开裂甚至破坏,严重威胁人们的生命财产安全。另一方面,研究土-结构接触面的力学特性是解决土与结构物相互作用问题的前提。由于土-结构接触问题广泛存在于土木工程领域,在荷载作用下,土-结构接触面的力学特性涉及大变形、非线性、局部不连续等复杂力学问题,使得接触面研究具有极大难度。

Potyondy^[1]早在1961年就利用应变控制式直剪仪研究了多种土与结构物材料接触面的力学特性。后来 Clough 等^[2]利用直剪试验研究土与混凝土接触面的力学特性,认为接触面剪应力与相对剪切位移为双曲线关系。殷宗泽等^[3]分析了土与混凝土接触面上的剪切变形特性,否定了上述双曲线渐变关系,提出了刚-塑性变形的观点。徐建平等^[4]对土受取样扰动影响进行了综述,建立了取样扰动土的评价指标体系。胡黎明等^[5]利用改进的直剪仪进行了砂土与结构物的接触面剪切试验,研究了相对粗糙度对接触面物理力学性质的影响,并通过数字照相技术记录了接触面附近砂土颗粒的位移情况,分析了土与结构物接触面剪切破坏的变形机理。张嘎等^[6-7]研制了大型土与结构接触面循环加载剪切仪,在试验基础上建立了一个可统一描述粗粒土与结构接触面力学特性的本构模型。周爱兆等^[8]系统介绍了接触面力学特性研究领域在试验模拟、本构模型以及计算方法方面的进展,分析不同试验仪器的特点,讨论现有接触面模型及计算方法的应用条件和存在的问题。于广云^[9]利用室内试验系统地研究了采动区垂直大变形对原状土物理、力学性质的影响规律。乔来军等^[10]用直接剪切试验研究了黄土-砂浆接触面抗剪强度随黄土含水率高低的变化规律。夏红春等^[11]利用超高压直剪试验系统,研究了不同试验条件下土-结构接触面的剪切力学特性,得到了剪切强度和剪切位移之间的关系。王伟等^[12]进行了不同含水率的土-结构接触面的改进直剪试验,并提出了一个新的接触面应力—位移复合指数模型。常虹等^[13]基于采动区扰动土的变化规律,设计了不同初始孔隙比和初始饱和度的土样,模拟采动过程中土的物理性质的变化,分析了法向应力、初

始孔隙比以及初始饱和度对接触面剪切特性的影响。陈俊桦等^[14]利用大型直剪仪对红黏土-混凝土试块接触面进行直剪试验,分析了粗糙度对接触面剪切变形及破坏的影响。

本文基于扰动土的变化规律,设计物理性质指标干密度、含水率、孔隙比和饱和度变化的扰动土样,模拟土的扰动程度。通过改进的试验方案在传统的应变控制直剪仪上系统地研究扰动土-结构接触面的抗剪强度特性,得到土样物理性质的改变对土-结构接触面抗剪强度的影响规律。

1 试验方案与扰动土样制备

1.1 扰动土样制备

试验土样取自河北省燕郊经济开发区,通过筛分试验,土的颗粒级配曲线如图1所示,根据《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)^[15]判定为中砂。

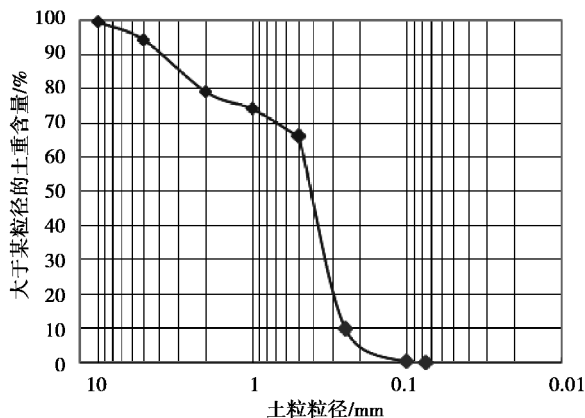


图1 颗粒级配分布曲线

Fig.1 Distribution curve of particle size

通过控制击实次数及加水质量,制备的重塑土样干密度分别为 1.6 g/cm^3 、 1.7 g/cm^3 、 1.8 g/cm^3 和 1.9 g/cm^3 ;含水率为 6%、8%、10%、15% 和 21%;孔隙比为 0.4、0.5、0.6 和 0.7;饱和度为 20%、40%、50% 和 70%。圆柱土样尺寸统一,直径和高度分别为 61.8 mm 和 20 mm,如图 2(a) 所示。

为反映常见的工程结构表面粗糙度,土-结构接触面设计了粗糙、光滑和极光滑 3 类粗糙度,其中粗糙和光滑两种粗糙度表面采用素混凝土制备,而极光滑表面采用钢材加工制备,如图 2(b)~(d) 所示。各类粗糙度表面的素混凝土和钢材试样与扰动土样尺寸相同,即直径和高度分别为 61.8 mm 和 20 mm。

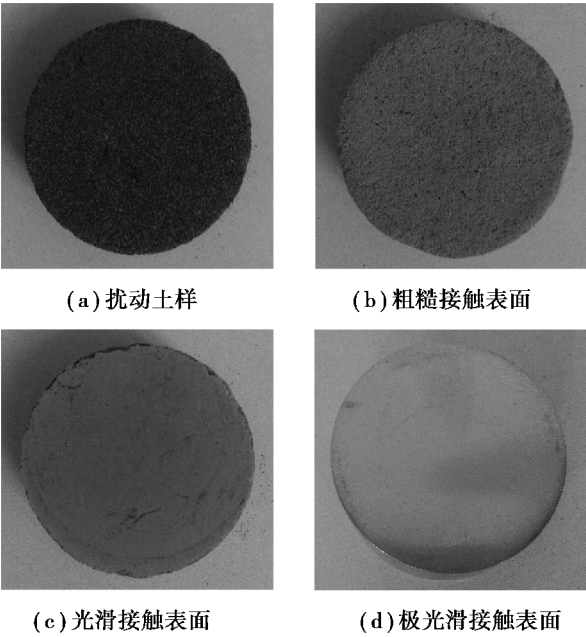


图 2 扰动土样及接触表面

Fig.2 Disturbed soil samples and the contact interfaces

1.2 试验方案

为进行扰动土-结构接触面抗剪强度试验,在传统的应变控制的 SDJ—II 三速电动等应变直剪仪上,对装样操作进行了改进。将混凝土或钢材圆柱试样置于直剪仪下盒内,使其表面正好处于上盒与下盒的界面位置,再放置固定直剪仪上盒,装入扰动土样。在扰动土样上表面铺设滤纸后,按传统剪切土样的试样步骤,施加荷载并启动电机转动推动下盒进行快剪剪切试验。读取数据结果,测定不同粗糙度条件下扰动土-结构接触面抗剪强度。

每类情况均进行了 2 次平行试验,取其平均值作为最后试验结果。

2 试验结果与分析

2.1 接触面粗糙度的影响

对于扰动土-结构接触面 3 类粗糙度,测得在不同法向应力下各接触面抗剪强度,其中干密度为 1.6 g/cm^3 、孔隙比为 0.68 和含水率为 8% 情况的试验结果,如图 3 所示。

虽然抗剪强度均随着法向压力的增加而呈线性增加,但 3 类粗糙度相应的外摩擦角差别较大。对于粗糙和光滑结构接触面,外摩擦角分别为

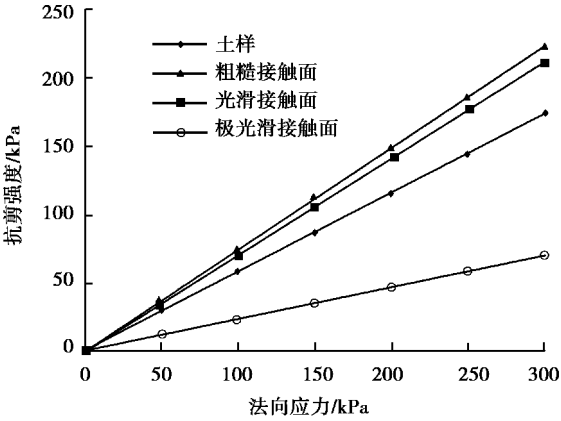


图 3 不同粗糙度接触面的抗剪强度

Fig.3 Shear strength of interface with different roughness

36.5° 和 35.3° ,均略高于扰动土的内摩擦角 30° 。而极光滑接触面的外摩擦角为 13.2° ,约为扰动土内摩擦角的 0.44 倍。

试验结果表明,对于不同接触面粗糙度,扰动土-结构接触面的抗剪强度及外摩擦角变化范围很大。确定扰动土-结构接触表面抗剪强度特性,需要同时考虑土的扰动程度和粗糙度两方面因素。

2.2 干密度的影响

对于接触面 3 类粗糙度,试验得到在不同干密度条件下的接触面抗剪强度,其中含水率为 8% 的扰动土样在法向应力为 100 kPa 作用下的试验结果如图 4 所示。

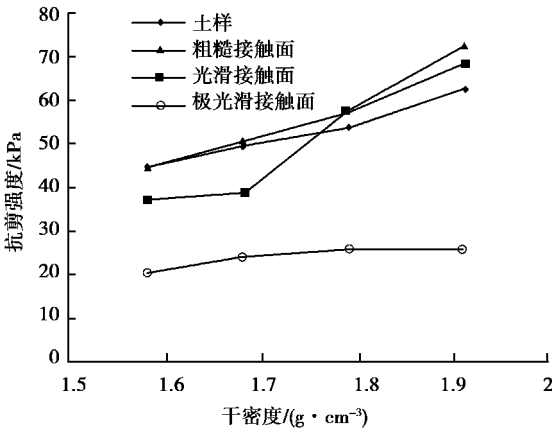


图 4 干密度与抗剪强度关系

Fig.4 Relationship between dry density and shear strength

各类粗糙度的土-结构接触面抗剪强度总体均随干密度的增大而非线性增大,其中极光滑接触面

抗剪强度随干密度变化很小,而粗糙和光滑两类粗糙度接触面抗剪强度的变化较为显著。

在法向应力一定的条件下,扰动及接触面抗剪强度分别由土的内摩擦角和接触面外摩擦角决定。试验结果表明,随着干密度的增加,扰动砂土内摩擦角和土-结构接触面外摩擦角都非线性增大。

2.3 含水率的影响

对于接触面 3 类粗糙度,试验得到不同含水率条件下各类接触面抗剪强度,其中干密度为 1.6 g/cm³、孔隙比为 0.68 的扰动土样,在法向应力 100 kPa 作用下的试验结果如图 5 所示。

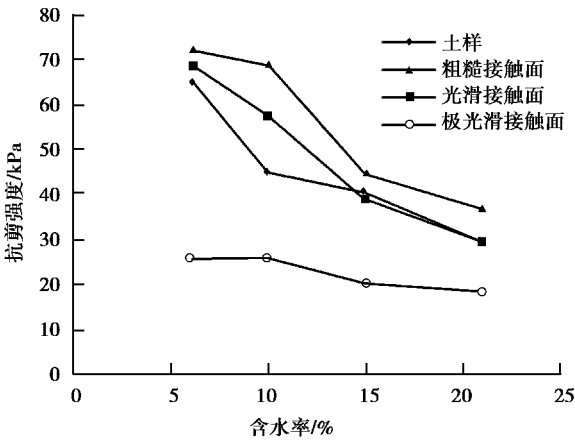


图 5 含水率与抗剪强度关系

Fig.5 Relationship between water content and shear strength

3 类粗糙度接触面的抗剪强度总体上均随含水率的增大而非线性减小,其中极光滑接触面抗剪强度受含水率变化的影响较小,而粗糙和光滑接触面抗剪强度较为显著。当含水率在 10%~15% 范围内变化时,土-结构接触面抗剪强度改变剧烈;而在这个范围之外,土-结构接触面抗剪强度变化相对较小。

与接触面抗剪强度相比,扰动土样抗剪强度总体上也随着含水率的增加而非线性减小,但变化快慢正好与接触面抗剪强度相反。当含水率在 10%~15% 范围内变化时,扰动土的抗剪强度改变相对较小;而在这个范围之外,土的抗剪强度变化较剧烈。

相应地,接触面外摩擦角与扰动土内摩擦角随含水率变化规律分别与上述接触面抗剪强度和土的抗剪强度变化规律一致。

2.4 孔隙比的影响

对于接触面 3 类粗糙度,试验得到不同孔隙比条件下各类接触面抗剪强度,其中含水率为 8% 的扰动土样在法向应力 100 kPa 作用下的试验结果,如图 6 所示。

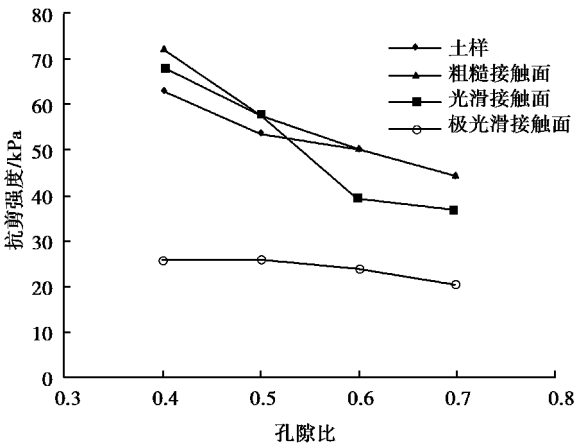


图 6 孔隙比与抗剪强度关系

Fig.6 Relationship between void ratio and shear strength

3 类粗糙度接触面的抗剪强度,总体上均随孔隙比的增大而非线性减小,其中极光滑接触面的抗剪强度受孔隙比变化影响较小,而粗糙、光滑接触面抗剪强度则随孔隙比变化影响较显著。砂土自身的抗剪强度随着孔隙比增加而减小,基本上呈线性变化。

相应地,随着孔隙比增加接触面外摩擦角呈非线性减小,而扰动土的内摩擦角基本呈线性减小。

2.5 饱和度的影响

对于接触面 3 类粗糙度,试验得到不同饱和度条件下各类接触面抗剪强度。其中,干密度为 1.6 g/cm³、孔隙比为 0.68 的扰动土样,在法向应力 100 kPa 作用下的试验结果如图 7 所示。

3 类粗糙度接触面的抗剪强度总体上均随饱和度的增大而非线性减小,其中极光滑接触面抗剪强度受饱和度改变影响较小,而粗糙和光滑两类接触面抗剪强度受饱和度改变影响较为显著。当饱和度在 40%~50% 范围内变化时,土-结构接触面抗剪强度改变非常剧烈,而饱和度在这个范围之外,土-结构接触面抗剪强度变化相对较小。

与接触面抗剪强度相比,土的抗剪强度总体也随着饱和度的增加而非线性减小,但在不同饱和度变化范围内,变化快慢正好与接触面抗剪强度情况相反。饱和度在 40%~50% 范围内变化时,扰动土

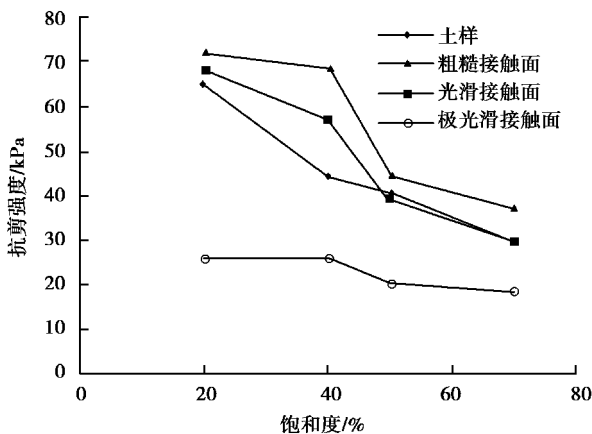


图 7 饱和度与抗剪强度关系

Fig.7 Relationship between degree of saturation and shear strength

的抗剪强度改变相对较小,而在这个范围之外,土的抗剪强度变化剧烈。

相应地,随着饱和度的变化扰动土-结构接触面的外摩擦角与扰动土内摩擦角分别与上述接触面抗剪强度和土样抗剪强度变化规律一致。

3 结论

基于扰动影响条件下土的物理性质的变化规律,设计了干密度、孔隙比、含水率、饱和度 4 类物理指标变化的扰动土样,采用粗糙、光滑和极光滑 3 类粗糙度接触面,反映地下工程中常见的土与混凝土、钢材表面接触特性。在传统应变控制的直剪仪上通过改进的试验方案,得到了扰动土-结构接触面抗剪强度。试验结果表明:

(1)在土-结构接触面试验中,3 类粗糙度接触的抗剪强度和相应的外摩擦角总体上均随含水率、孔隙比和饱和度的增大而非线性减小,而随干密度的增加而非线性增加。当含水率在 10%~15%或饱和度在 40%~50% 范围内变化时,各类粗糙度接触面的抗剪强度和外摩擦角变化最为显著,而在上述范围之外,变化相对较小。

(2)对于各类扰动土样,扰动土-结构极光滑接触面抗剪强度的变化很小,这意味着,在工程中可以忽略土的扰动对此类接触面抗剪强度的影响。

参考文献 (References)

[1] Potyondy J G. Skin friction between various soils and

construction materials [J]. Geotechnique, 1961, 11 (4): 339-353.

[2] Clough G W, Duncan J M. Finite element analysis of retaining wall behavior [J]. Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1971, 97 (12): 1657-1672.

[3] 殷宗泽,朱泓,许国华. 土与结构材料接触面的变形及其数学模拟 [J]. 岩土工程学报, 1994, 16(3): 14-22. (Yin Zongze, Zhu Hong, Xu Guohua. Deformation and mathematical simulation of the contact surface between soil and structural material [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 16(3): 14-22. (in Chinese))

[4] 徐建平,周健,白冰. 土体取样扰动的影响及其评价指标 [J]. 佛山科学技术学院学报 (自然科学版), 2000, 18(3): 20-24. (Xu Jianping, Zhou Jian, Bai Bing. The effects of sample disturbance on soil and the establishment of its evaluation index [J]. Journal of Foshan University (Natural Science Edition), 2000, 18 (3): 20-24. (in Chinese))

[5] 胡黎明,濮家骝. 土与结构物接触面力学特性试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2001, 23(4): 431-435. (Hu Liming, Pu Jialiu. Experimental study on mechanical characteristics of soil-structure interface [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23 (4): 431-435. (in Chinese))

[6] 张嘎,张建明. 大型土与结构接触面循环加载剪切仪的研制及应用 [J]. 岩土工程学报, 2003, 25(2): 149-153. (Zhang Ga, Zhang Jianmin. Development and application of cyclic shear apparatus for soil-structure interface [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(2): 149-153. (in Chinese))

[7] 张嘎,张建明. 粗粒土与结构接触面统一本构模型及试验验证 [J]. 岩土工程学报, 2005, 27(10): 1175-1179. (Zhang Ga, Zhang Jianmin. Unified modeling of soil-structure interface and its test confirmation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27 (10): 1175-1179. (in Chinese))

[8] 周爱兆,卢廷浩,刘尧. 土与结构接触面力学特性研究现状与展望 [J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2007, 35(5): 524-528. (Zhou Aizhao, Lu Tinghao, Liu Yao. Current research and prospect of mechanical behaviors of soil-structure interfaces [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2007, 35(5): 524-528. (in Chinese))