

土与结构接触面等应力增量比路径 单剪试验力学特征分析

周爱兆^{1,2}, 卢廷浩^{1,2}, 吴世龙^{1,2}

(1. 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210098)

摘要 利用大型单剪仪(DHJ-30)进行含砾粗砂与结构物接触面的等应力增量比路径单剪试验, 研究加载路径及初始法向应力对接触面物理力学性质的影响。研究结果表明, 土与结构物接触面的破坏强度与加载路径无关, 破坏与否与加载路径相关, 只有加载路径与抗剪强度包线相交才会发生破坏。初始法向应力一定时, 加载应力增量比越小则剪应力~切向位移关系曲线初始阶段的切向劲度系数越大, 法向压缩量峰值越大, 最终剪胀量越小。加载应力增量比一定时, 初始法向应力越大则剪应力~切向位移关系曲线初始阶段的切向劲度系数越大, 法向压缩量峰值越大, 最终剪胀量越小。

关键词 接触面 等应力增量比路径 单剪试验 抗剪强度 剪胀量

中图分类号 : TU43

文献标识码 : A

文章编号 : 1006-7647(2008)05-0032-04

Mechanical characteristics of the soil-structure interface in response to simple shear tests under constant stress increment ratio paths//ZHOU Ai-zhao^{1,2}, LU Ting-hao^{1,2}, WU Shi-long^{1,2} (1. Key Laboratory of Geomechanics and Embankment Engineering of Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Geo-technical Research Institute of Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract : By use of a large simple shear test apparatus (DHJ-30), a series of soil-structure simple shear tests under different constant stress increment ratio paths were performed to study the effects of loading path and initial normal stress on the mechanical characteristics of the soil-structure interface. Test results show that the shear strength of the soil-structure interface is not correlated with the loading path. However, failure of the soil-structure interface is associated with the loading path, and the interface will fail when the loading path is intersected by the shear strength envelope. The shear stress-shear displacement curve is influenced by the loading path and initial normal stress. When the initial normal stress is constant, the shear stiffness of the starting stage of the curve decreases with the loading stress ratio. In contrast, when the loading path is constant, the shear stiffness increases with the initial normal stress. The peak value of normal compression increases with the initial normal stress and decreases with the loading stress ratio, while the final value of shear dilatancy decreases with the initial normal stress and increases with the loading stress ratio.

Key words : interface; constant stress increment ratio path; simple shear test; shear strength; shear dilatancy

土与结构接触面的力学特性研究是解决土与结构物相互作用问题的前提。人们自 20 世纪 60 年代以来就开始了土与结构物接触面力学行为的探索工作, 进行了大量的试验研究。早在 1961 年, Potyondy^[1]利用应力控制式和应变控制式直剪仪研究了多种土料与结构物材料接触面的力学特性。Clough 等^[2]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。Desai 等^[3]研制大尺寸多自由度剪切仪

(CYMDOF), 并用其进行接触面的静力和动力特性试验研究。殷宗泽等^[4]进行了土与混凝土接触面的大尺寸试样直剪试验, 通过埋设在混凝土试样中的微型“潜望镜”装置直接观察了相对位移沿接触面的分布, 试验中发现接触面的剪切破坏是一个由边缘向内部发展的过程, 提出接触面刚塑性变形的观点。Uesugi 等^[5]和 Kishida 等^[6]用单剪仪对砂与钢板接触面的力学性能进行了较为深入的研究。Fakharian^[7]利用接触面三维试验设备(CCDSSI)进行

砂和钢板的接触面力学特性研究。胡黎明等^[8]利用宏观和微观观测相结合的手段,系统研究了土与结构物接触面的剪切变形机理和力学特性。张嘎等^[9-10]研制了大型土与结构接触面循环加载剪切仪(TH-20t CSASSI),并用其进行了大量的粗粒土与结构接触面的静力学特性及动力学特性研究,探讨了接触面的可逆性与不可逆性剪胀规律。

以上土与结构接触面的剪切试验着重研究常法向应力条件下的接触面剪切特性,然而工程界常会遇到法向应力与剪应力同时变化的实际工程问题,如加筋土挡墙填筑过程中筋材与填筑材料之间的相互作用问题、坝前水位变化过程中混凝土防渗墙与周围土体的相互作用问题等,因此有必要开展复杂应力路径条件下接触面力学特性研究^[11]。笔者利用河海大学研制的大型单剪仪(DHJ-30)进行不同等应力增量比路径下的单剪试验,系统研究了不同应力路径下土与结构物接触面的剪切变形机理和力学特征。

1 土与结构物接触面等应力增量比路径单剪试验

结构物材料采用表面含有一定糙度的钢板来模拟,试验前在钢板表面抽槽,形成一系列峰谷,使钢板具有一定的糙度;土体材料采用级配良好的含砾粗砂模拟。试验砂不同级配质量比分别为:15.8%(粒径 $5\sim 2\text{ mm}$),20.3%(粒径 $2\sim 1\text{ mm}$),26.2%(粒径 $1\sim 0.5\text{ mm}$),15.8%(粒径 $0.5\sim 0.25\text{ mm}$),21.9%(粒径小于 0.25 mm)。基本物理力学性质参数为:比重 $G_s=2.62$,干密度 $\rho_{d\min}=1.52\text{ g/cm}^3$, $\rho_{d\max}=1.87\text{ g/cm}^3$,孔隙比 $e_{\max}=0.72$, $e_{\min}=0.40$,不均匀系数 $C_u=10.22$,曲率系数 $C_c=1.82$ 。试验中考虑4种初始法向应力: $\sigma_0=50\text{ kPa}$, 100 kPa , 200 kPa 和 400 kPa 5种等应力增量比路径: $\eta=0.5,1.0,2.0,4.0,\infty$,合计20组试验。其等应力增量比路径定义为试样在剪切过程中保持剪应力增量与法向应力增量成一定比例 $\eta(\eta=\Delta\tau/\Delta\sigma)$, η 为常数,当 $\eta=\infty$ 时即为常规单剪试验。

大型单剪仪(DHJ-30)的主机采用板式框架结构,如图1所示。剪切时顶层叠环无移动,在每层叠环之间均安装有钢球以减少摩擦阻力。在下剪切盒侧面安装2根拉杆,与水平反力梁相连后构成切向力系统。剪切盒下侧面安装有导向钢球,防止剪切时产生侧向转动,剪切盒下面配有滚动轴排,可减少剪切时的摩擦阻力。法向荷载及切向推力采用液压加载,采用载荷传感器(电子测力计)采集,垂直及水平位移测量采用光栅位移传感器。设备配套有计算



图1 试验仪器 DHJ-30

机自动数据采集处理系统,可完成荷载、位移的采集存储以及切向推力的自动控制。

试样为圆柱形,直径 300 mm 、高 35 mm ,试验砂干密度为 1.79 g/cm^3 ,相对密度为 0.80 ,属于密实砂土,剪切速率为 0.35 mm/min 。试样在一定的初始法向荷载下开始剪切,剪切时按设定的应力增量比加载至试样破坏,达到破坏后法向压力维持不变,继续剪切至切向位移达到 30 mm 时停止试验。由于低剪切应力增量比加载时(例如 $\eta=0.5$)试样不出现破坏情况,因此试验时按等应力增量比路径加载至法向荷载达到 $1\,100\text{ kPa}$ 后,维持法向荷载恒定,继续剪切至切向位移达到 30 mm 时停止试验。

2 试验成果及分析

2.1 接触面强度特性

通过接触面单剪试验,可以得到剪切过程中土与结构接触面的 $\tau\sim\omega$ (剪应力~切向位移)、 $\nu\sim\omega$ (法向位移~切向位移)关系曲线。试验结果表明,不同初始法向应力条件下,应力增量比对剪应力与切向位移关系曲线的影响规律基本一致。文中仅对初始法向应力为 200 kPa 下不同等应力增量比路径的试验结果以及等应力增量比为 2.0 时不同初始法向应力下的试验结果进行分析。

图2为接触面剪应力与切向位移关系曲线。由图2可见,土与结构接触面的剪应力 τ 与切向位移 ω 呈非线性关系:当 τ 较小时,切向劲度系数较大;当 τ 较大时,切向劲度系数较小。剪应力达到峰值后,切向位移进一步增大的过程中,剪应力与相对位移关系表现出一定的应变软化,且接触面达到峰值时对应的法向应力越大,软化现象越明显。接触面剪应力在达到峰值强度前是按照等应力增量比路径进行加载的,由图2(a)可见,不同的加载路径对应不同的剪应力~切向位移关系曲线,应力增量比 η 越小,曲线越陡,即具有较大的切向劲度系数。图2(b)表明,同一应力增量比加载路径下,初始法

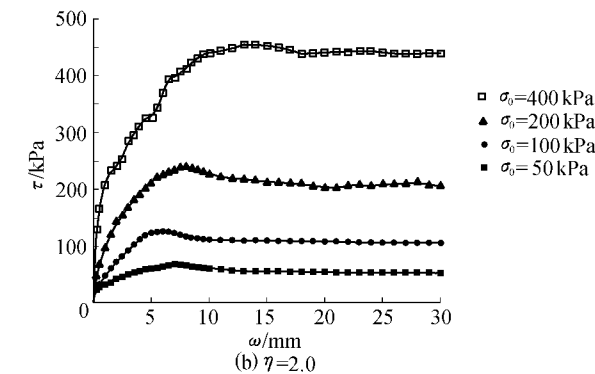
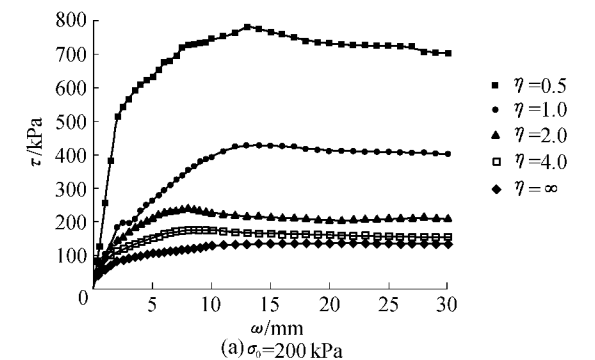


图 2 $\tau \sim \omega$ 关系曲线

向应力 σ_0 越大,曲线越陡,切向劲度系数越大。

土体与结构物接触面的强度由它们两者的特性共同决定。剪切过程中,土体与结构物交界面附件形成一剪切错动带,剪切错动带内的土体有较大的切向位移和明显的法向位移以及颗粒的转动,诸多文献^[8-10]已证实这一现象的存在。剪切错动带内土颗粒接触面上的滑动摩擦、土颗粒与结构物材料间的摩擦,以及土体积膨胀所产生的阻力和土颗粒重新排列受到的阻力共同构成了接触面的抗剪强度。该试验中试样相对密实度达到 0.80,属于密实砂。密实砂土在达到峰值强度时土颗粒之间不发生很大移动,土颗粒重新排列所做的功很小,但是土体积膨胀很大。产生软化的原因是强度达到峰值后试样变松,土粒间的咬合作用削弱,强度随应变增加逐渐减小,在剪应力~切向位移曲线上表现为应变软化。剪切过程中,外力做功主要起 2 个作用:一是克服接触面的摩擦,二是克服法向应力对剪胀的阻力。应力增量比 η 越小,法向应力增量 $\Delta\sigma$ 增加越快,法向应力越大,颗粒达到相同变形时需要克服阻力所做的功越多,表现在剪应力~切向位移曲线上即曲线较陡,具有较大的切向劲度系数。同一应力增量比加载,法向应力增量 $\Delta\sigma$ 相同时,初始法向应力 σ_0 越大则外力所做的功越多,切向劲度系数越大。

图 3 给出了单剪试验得到的土与结构接触面强度包线以及初始法向应力为 200 kPa 时不同应力增量比的加载路径。从图 3 可以看出,在本文试验的法向应力范围内,接触面的抗剪强度与法向应力呈

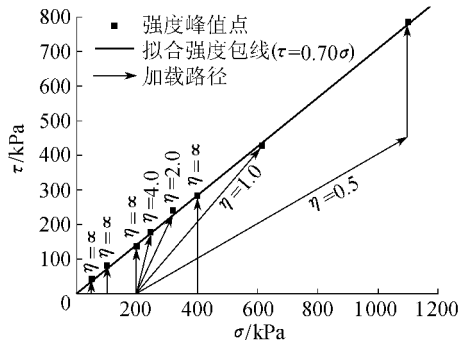


图 3 接触面抗剪强度及加载路径

较好的线性关系,接触面的抗剪强度可以用莫尔-库仑准则中的摩擦角 φ 表示。接触面的破坏强度大小与加载路径无关,仅与破坏时对应的法向应力密切相关。接触面是否破坏、破坏的快慢与加载路径有关,只有加载路径与强度包线相交时接触面才会发生破坏。应力增量比越小,接触面破坏时对应的法向应力越大,破坏强度越高。

2.2 法向变形特性

图 4 为法向位移与切向位移关系曲线。从图 4 可以看出,剪切初始阶段土颗粒彼此紧贴,土体体积稍有减小,表现出一定的剪缩,随后由于咬合颗粒之间的错动,土体体积迅速增加,最后曲线趋于平缓,表现出一定的剪胀。图 4(a)表明土体法向变形的基本特性与应力路径相关,在相同的初始法向应力下,应力增量比 η 越小则初始阶段的压缩量越大,最终的剪胀量就越小。图 4(b)表明加载应力增量比一定时,初始法向应力越大则剪切过程中的压缩

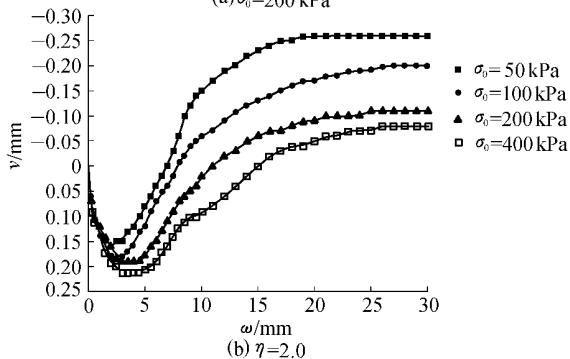
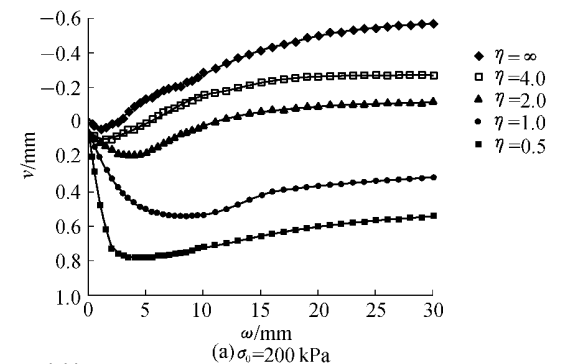


图 4 $v \sim \omega$ 关系曲线

量峰值越大,最终的剪胀量越小。

土体剪胀特性是剪切过程中土体颗粒破碎、转动、滑移的宏观反映,这一系列运动与试样所受的法向正应力密切相关。在剪切过程中考虑不同的加载路径,达到破坏强度之前法向应力不断增加,故法向位移在试样破坏前是法向应力和剪应力共同作用的综合反映,破坏后维持法向应力恒定,法向位移仅由剪应力作用引起。初始法向应力 σ_0 一定时,应力增量比 η 越小则法向应力增量 $\Delta\sigma$ 增长越快, $\Delta\sigma$ 引起的法向压缩在整个法向位移中占主导地位,故剪胀曲线较陡,法向压缩量较大。按低应力增量比加载时,试样破坏时对应的法向应力较大,土体产生剪胀需要克服的阻力较大,故剪胀量相对较小。当应力增量比一定时,初始法向应力越高则对应的抗剪强度越高,相应的法向应力增量 $\Delta\sigma$ 越大,故法向压缩量峰值相对较大。同样较高的初始法向应力对应较大的破坏峰值法向应力,法向应力越大则剪胀量越小,即应力增量比一定时,初始法向应力越大则最终的剪胀量越小。

3 结 语

应用大型单剪仪(DHJ-30)进行含砾粗砂与钢板接触面不同应力增量比路径下的单剪试验,系统研究加载应力路径及初始法向应力对土与结构物接触面的剪切变形机理和力学特性的影响,结果表明:

a. 土与结构物接触面的破坏强度与加载路径无关,破坏与否与加载路径相关,只有加载路径与抗剪强度包线相交才会发生破坏。

b. 初始法向应力 σ_0 一定时,应力增量比 η 越小,对应的 $\tau \sim \omega$ 曲线越陡,具有较大的切向劲度系数。加载应力增量比一定时, σ_0 越大则 $\tau \sim \omega$ 曲线越陡,切向劲度系数越大。

c. 按等应力增量比路径加载,法向位移是法向应力增量与剪应力共同作用的综合反映。初始法向应力一定时,加载应力增量比 η 越小则法向压缩量峰值越大,最终剪胀量越小;加载应力增量比一定时,初始法向应力 σ_0 越大则法向压缩量峰值越大,最终剪胀量越小。

通过上述研究可以发现,在实际工程中选取合适的加载路径可以避免接触面的剪切破坏。加载路径不同,表现出不同的剪应力~切向位移关系曲线,需要建立考虑加载路径的接触面本构关系,使得相关数值模拟与工程实际更加吻合。如何分离法向位移中法向应力引起的压缩分量以及剪切引起的剪胀分量,以及进一步量化并建立相应的模型还有待于进一步研究。

参考文献:

[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 analyses of retaining wall behavior [J]. Journal of Soil Mechanic and Foundation Division, ASCE, 1971, 97(12) :1657-1673.

[3] DESAI C S, DRUMM E C, ZAMAN M M. Cyclic testing and modeling interfaces [J]. Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1985, 111(6) :793-815.

[4] 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.

[5] UESUGI M, KISHIDA H. Influential factors of friction between steel and sands [J]. Soils and Foundations, 1986, 26(2) :33-46.

[6] KISHIDA H, UESUGI M. Test of interface between sand and steel in the simple shear apparatus [J]. Journal of Geotechnique, 1987, 37(1) :45-52.

[7] FAKHARIAN K. Three-dimensional monotonic and cyclic behavior of sand-steel interfaces [D]. Ottawa: University of Ottawa, 1996.

[8] 胡黎明,濮家骊.土与结构物接触面物理力学特性试验研究[J].岩土工程学报,2001,23(4) :431-435.

[9] 张嘎,张建民.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.

[10] 张嘎,张建民.粗粒土与结构接触面的可逆性与不可逆性剪胀规律[J].岩土力学,2005,26(5) :699-705.

[11] 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.

(收稿日期 2007-11-27 编辑 高建群)

《水利水电科技进展》征订启事

(邮发代号 28-244, CN32-1439/TV,
ISSN1006-7647, 双月刊, A4 开本)

《水利水电科技进展》由河海大学主办,是全国中文核心期刊,中国科技核心期刊,全国水利系统优秀期刊,华东地区优秀期刊,江苏省优秀期刊。主要刊登水科学、水工程、水资源、水环境、水管理方面的科技论文,主要栏目有水问题论坛、研究探讨、工程技术、水管理、专题综述、国外动态等,适合与水利、水电、水科学、水工程、水资源、水环境有关的科研、工程、管理人员以及大专院校师生阅读。

本刊由邮局发行,邮发代号 28-244,2009 年每期定价 10 元,全年 6 期共计 60 元。可在全国各地邮局订阅,也可直接向编辑部订阅。编辑部地址:210098 南京市西康路 1 号《水利水电科技进展》编辑部。联系电话:025-83786335, E-mail: jz@hhu.edu.cn, http://kbb.hhu.edu.cn。