

doi:10.11835/j.jssn.1000-582X.2013.08.019

水泥土泥皮下土与结构接触面的单剪特性

彭 凯^{1,2}, 朱俊高^{2b}, 冯树荣¹, 蔡昌光¹, 朱 晟^{2a}

(1. 中国水电顾问集团 中南勘测设计研究院, 长沙 410014;

2. 河海大学 a. 水工结构研究所; b. 岩土工程科学研究所, 南京 210098)

摘 要:采用大型单剪仪进行粗粒土与混凝土接触面在水泥土泥皮(粘土中掺入水泥)条件下的剪切试验,揭示泥皮条件下接触面的力学特性与机理。试验结果表明,峰值强度以及剪胀发生所对应的位置与法向应力大小有关,峰值强度所对应的剪应变滞后于产生剪胀的位置。剪切破坏时,在同一高度处,法向应力越大,切向位移也越大;同样的法向应力及高度处,切向位移随水泥含量的提高而增大。以单剪试验为原型,采用颗粒流模拟程序 PFC 建立水泥土泥皮条件下粗粒土与混凝土接触面的单剪模型,通过对接触面试验试样内部特征点在剪切过程中运动状态的追踪,分析了土体的扰动高度及其主要影响因素。研究发现,扰动高度与粗粒土的最大粒径、法向应力以及粗糙程度(有无泥皮)等有关。对粗粒土,靠近结构面 3~4 倍最大粒径的区域内土颗粒切向位移明显,形成明显的剪切错动带,因此,建议该剪切错动带厚度为有厚度接触面单元厚度。

关键词:接触面;单剪试验;水泥土泥皮;剪胀;颗粒流

中图分类号: TU411

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2013)08-127-09

Study on mechanical behaviors of interface with cemented soil slurry between gravel and concrete by simple shear tests

PENG Kai^{1,2}, ZHU Jungao^{2b}, FENG Shurong¹, CAI Changguang¹, ZHU Sheng^{2a}

(1. Zhongnan Engineering Corporation, HydroChina, Changsha 410014, China; 2 a. Institute of Hydraulic Structures; b. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The mechanical behaviors of the interface between coarse-grained soil and concrete are investigated by simple shear tests under conditions of cemented soil slurry (clay mixed with cement grout). The results show that the relation curve between shear stress and shear strain appears stress-strain softening and shear dilatation is significant. The point of peak strength and the position when the shear dilatation occurs are related to normal stress. In addition, shear dilatation occurs before the shear stress reaches peak value. In shear failure state, with the same height, the shear displacement increases as the normal stress increases. While with the same normal stress and at the same height, the shear displacement increases as the concrete content increases. A particle flow model of simple shear test between interface between coarse-grained soil and concrete is constructed by PFC (particle flow code). The disturbed height of the sample and the main influence factors are determined by analyzing the laws of particle motion at different heights inside the sample. The PFC results show disturbed height of the sample is related to maximum particle diameter of the soil, normal stress and roughness of the interface (with or without

收稿日期: 2013-02-16

基金项目: 水利部公益性行业科研专项经费项目(200801133); 中央高校基本科研业务费专项资助项目(2010B14814); 国家自然科学基金资助项目(50825901)

作者简介: 彭凯(1981-), 男, 博士后, 主要从事土体本构关系研究, (E-mail) pengkai@hhu.edu.cn.

slurry) etc. In terms of the coarse-grained soil, the shear displacement is significant in the area which is close to the interface and about 3-4 times of the maximum particle diameter, and informed the obvious shear band. Further, the thickness of the interface can be regarded as the value.

Key words: interface; simple shear test; cemented soil; shear dilation; particle flow code

多年来,土与结构物相互作用的问题一直是岩土工程重要研究课题之一^[1-9]。目前,较多研究者对土与结构接触面力学特性的基本规律、影响因素及模拟分析方法进行了研究,取得了一系列的成果^[1-2,10-18]。

殷宗泽等^[19]采用微型“潜望镜”对接触面土体的变形进行观察,认为接触面的破坏是一个由边缘向内部逐渐扩展的过程;张治军等^[20]分析了泥皮厚度以及含水量变化对粗粒土与混凝土接触面的影响;张嘎等^[21]研究了接触面的静动力学特性及不同的剪切方式对其的影响。张苗忠^[22]研究了泥皮土和桩间土在物理力学性状上的差异,分析了泥皮土对钻孔灌注桩桩侧摩阻力的影响。彭凯等^[23]研究了不同泥皮种类对接触面力学特性的影响;Fleming^[24]利用改进的直剪仪研究了土工无纺布与土体接触面的力学特性。

此外,数值模拟是土石料组构研究的另一重要手段,DEM法(distinct element method)是当前国内外较为流行的数值方法。在土力学研究方面,文献[25-26]介绍了采用离散元法模拟砂土直剪和双轴试验的情况。Thornton和Zhang用离散元法模拟了土力学的直剪试验^[27]。吴剑等采用PFC颗粒流程序对无粘性土进行环剪试验研究,分析了剪切边界条件对剪切带的影响^[28]。

实际工程中,由于施工工艺的影响,防渗墙与粗粒土之间会存在泥皮,而泥皮的存在会影响或改变粗粒土与结构面的力学特性,使得粗粒土与混凝土的荷载分担发生变化。目前对于接触面存在泥皮情况下的研究相对较少。

有厚度接触面单元在确定其单元厚度方面存在着很大的模糊性,由计算公式可知,单元厚度 t 的变化直接影响确定劲度系数所依据的剪应力与剪应变关系曲线。有学者建议采用厚度 t 与单元宽度 B 的比值(t/B)的取值范围来确定薄层单元的厚度是不恰当的,由此会带来厚度随单元宽度取值的不同而变化,这就意味着土与结构发生力的传递时,其剪切错动带会因计算中所取单元宽度 B 的不同而不同,这显然是不合理的。

为此,文中对粗粒土与混凝土结构面在水泥土泥皮(粘土中掺入水泥)的情况进行了大型单剪试

验,分析了其应力变形特性。采用颗粒流程序,通过对试样内部特征点的动态跟踪分析,得到了试样的最大扰动高度。建议采用剪切错动带的高度来确定接触面单元厚度,而剪切错动带的高度可以通过接触界面上试样内部的最大扰动高度来反映。

1 接触面试验结果及分析

1.1 试验仪器、材料及方案

试验采用大型单剪仪如图1(a)所示。每个叠环厚20 mm,内径为300 mm,试样总有效高度为100 mm。试验时,每个叠环设置剪位移传感器,施加法向压力 σ_n ,测得不同剪应力 τ 作用下水平位移 δ ,可求得厚度 t 范围的剪应变 γ 为

$$\gamma = \delta/t, \tau = T/A, \sigma_n = P/A, \quad (1)$$

式中: P, T 为作用于接触面的垂直荷载和水平荷载; A, t 为接触面的面积及厚度,如图1(b)所示。

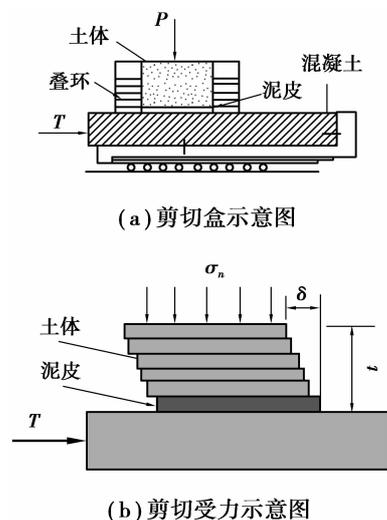


图1 单剪盒及接触面试样受力示意图

试验粗粒土采用长河坝覆盖层粗粒料,最大粒径为20 mm。粗粒土最大干密度为 2.18 g/cm^3 、最小干密度为 1.77 g/cm^3 。试验控制干密度为 2.13 g/cm^3 ,相对密度0.9。级配曲线如图2所示。

所谓水泥土泥皮,就是在粘土泥皮中加入一定量的水泥,水泥含量分别为 $\omega_c = 5\%、10\%、20\%$,以此研究实际工程中因灌注混凝土形成泥浆护壁与水泥的混合物对接触面的影响。

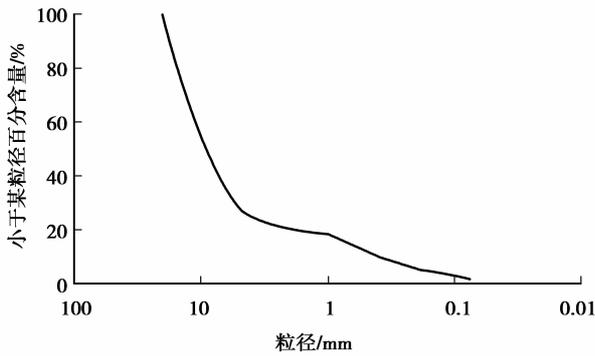


图 2 粗粒料粒径累计级配曲线

接触面试验中,粘土的干密度为 1.64 g/cm^3 ,含水量 30%,塑限 20%,液限 34%,比重 2.75。其掺入水泥浆的水灰比 1.5 : 0.5。底座混凝土采用 C30,混凝土配合比(水 : 水泥 : 砂子 : 石子)为 0.38 : 1 : 1.11 : 2.72,砂采用中砂,细度模数为 2.94,石子为 5~40 mm 连续粒级,混凝土块的长、宽、高为 400 mm × 370 mm × 110 mm。为了尽可能地接近工程实际,在混凝土底座表面随机制作了一些凹凸不平,高度差 2~3 mm,以此来模拟混凝土的粗糙度。考虑到单片叠环厚 20 mm,为了保证剪切时剪切面发生在粗粒料与泥皮的接触界面附近,因此水泥土泥皮厚度取 20 mm。

制备水泥土泥皮时,先按规定厚度以及配合比将其平铺在钢模里,然后轻轻抹平,待初具强度后,将其放入水中养护凝固 28 d,泥皮的制作如图 3 所示。试验时,先将制好的泥皮取出平放在混凝土底座上,再套上 20 mm 厚的单剪环,其上再分 3 层铺放粗粒土,振捣至试验设计密度,以此来模拟粗粒土与结构物之间存在泥皮的情况。与此同时,为了保持泥皮的含水率,对混凝土底座以及第 1 层粗粒土洒水充分进行湿润。试验的法向应力分别为 200、500、1 200、2 000 kPa,剪切速率 0.3 mm/min。

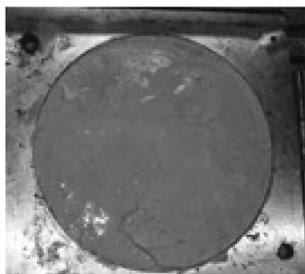


图 3 水泥土泥皮的制作

1.2 接触面的抗剪强度及变形特性

不同水泥含量下剪应力 τ 与剪应变 γ 以及法向应变(ϵ_n)与剪应变(γ)的关系曲线见图 4 及图 5。文中取位移以剪缩为正,剪胀为负。

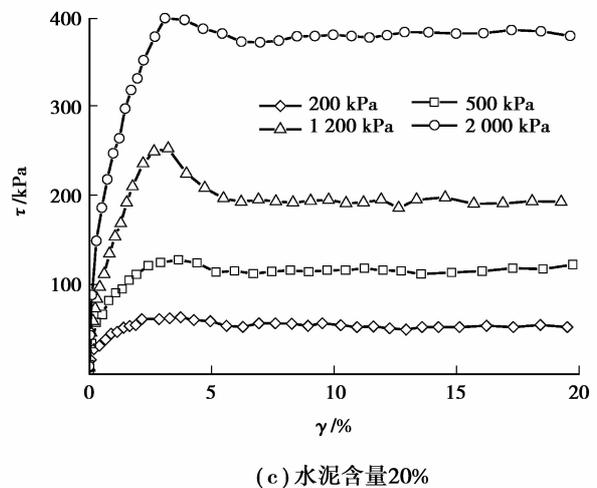
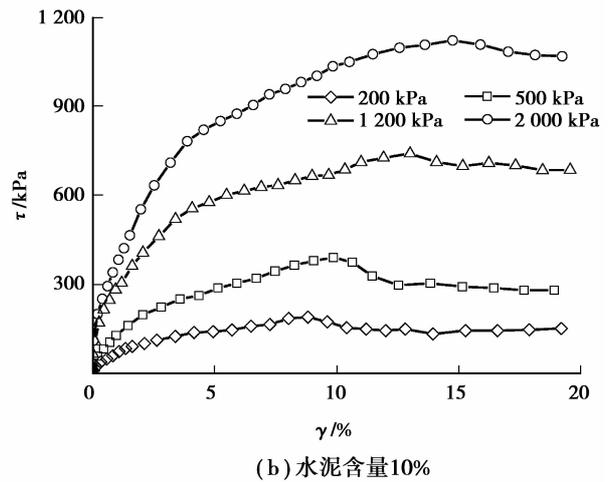
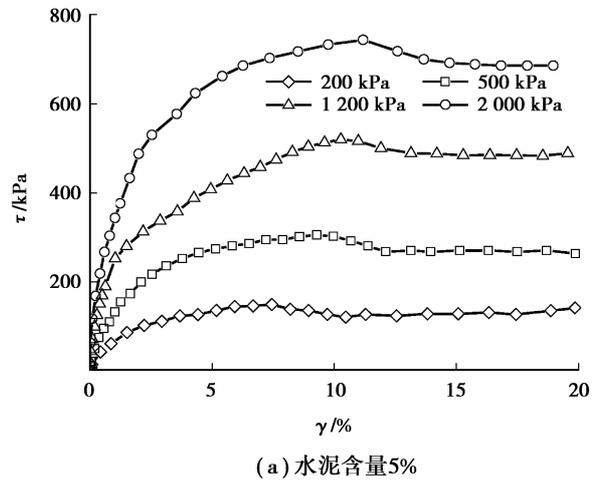
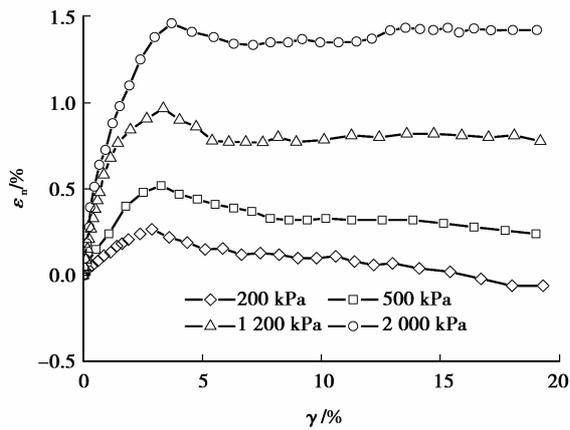
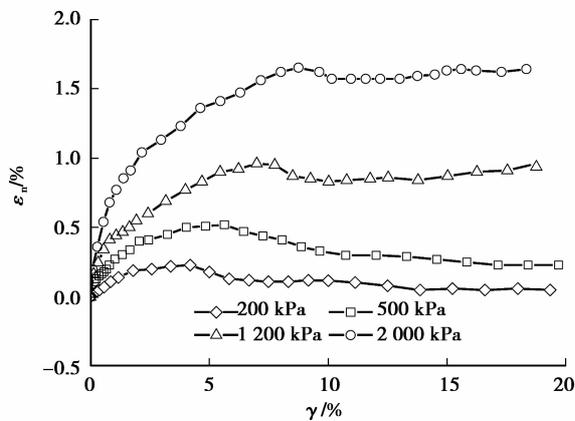


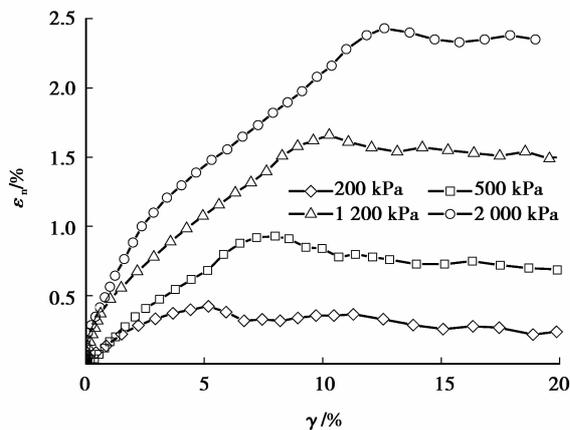
图 4 不同水泥含量 τ - γ 关系曲线



(a) 水泥含量5%



(b) 水泥含量10%



(c) 水泥含量20%

图5 不同水泥含量 ε_s - γ 关系曲线

土体抗剪强度主要由接触面与结构物的摩擦力、土体体积膨胀产生的阻力以及颗粒重新排列所受到的阻力三者共同构成,从根本上讲,破坏面最终总是沿着剪切强度最小的面发生。

由图4可以看出,接触面剪应力与剪应变 $\tau \sim \gamma$ 关系曲线出现明显的软化现象,剪应力峰值发生的

位置与法向应力的的大小及水泥含量有关。法向应力越大,峰值强度所对应的剪应变越大;相同法向应力下,随着水泥含量的不断增大,峰值强度发生的位置不断增大。图4同时表明,初始剪切阶段,切向劲度系数较大,随着剪切的进行,其逐渐减小。法向应力越大,其相应的劲度系数也越大。此外,峰值强度以后,剪应力的的大小基本趋于恒定,表明剪切时外力做功主要集中在克服接触面的摩擦以及克服剪胀阻力上。

由图5可以看出,接触面表现出明显的剪胀特性。法向应力越小,剪胀越明显。剪胀发生的位置与法向应力与水泥含量有关系。某一水泥含量下,法向应力越大,剪胀所对应的剪应变越大;相同法向应力下,水泥含量越大,剪胀所对应的剪应变越大。图5表明试样的剪胀量并不大,这主要有两方面的原因,一是剪切过程中,水泥土泥皮一部分嵌入粗粒料的孔隙当中,一部分从缝隙中挤出来;另一方面由于部分粗粒土产生颗粒破碎,使得体积膨胀变形较小,从而导致了这一现象的出现。另外,同一法向荷载下,先出现剪胀而后剪应力才达到峰值。

土体的剪胀剪缩特性是剪切过程中土体颗粒的破碎、转动、滑移、咬合颗粒的错动及重新排列的宏观反映,这一系列的运动特性与颗粒的形状、颗粒粒径的大小、法向应力的的大小、土体的密实度以及土体与结构物接触面的接触特性等因素有密切的联系。

图6给出了不同法向应力下,沿试样高度方向的不同高度处的水平位移。图中,竖轴“0”代表位移零点,对应于试样顶部最上面叠环;“6”表示底座混凝土位移。图中方案1~方案3分别代表水泥土泥皮水泥含量分别为5%、10%、20%的情况,以下同。

图6表明,剪切过程中,在结构交界面附近,剪切变形呈不均匀或非连续的变化,说明这个区域存在剪切变形相对集中的剪切带。同一高度处,水泥含量越大,叠环的水平位移越大。法向应力越大,同高度处叠环的水平位移也越大。

试验结果表明,剪切过程中,既有粗粒土内部的剪切变形,也有沿着粗粒土与混凝土界面的相对错动位移。剪切应力较小时,剪切变形主要发生在结构交界面处,说明此时控制接触面的剪切强度主要取决于结构交界面的剪切模量;随着剪切应力的增大,在试样内部也可能出现剪切位移相对集中的区域,当发生在试验内部的剪切强度与交界面的剪切强度接近时,结构面附近一定区域的泥皮和粗粒土

发生了和原来不同的力学响应(见图6),此时与结构面共同构成了有厚度的接触面。

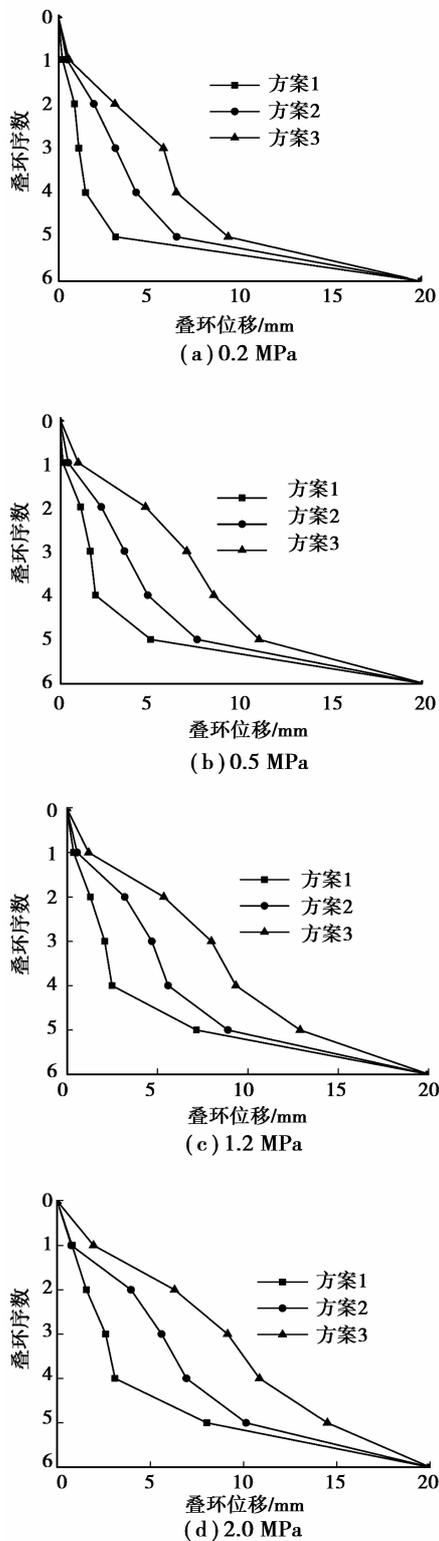


图6 不同法向应力下沿试样高度方向的剪切位移

值得注意的是,由图6可以看出,剪切时试样内部的扰动已经到达试样顶部位置,考虑到试验时顶

部的约束效应,试样的扰动高度可能会更大,而由于试验仪器的限制,试样的最大有效高度明显不足,因此有必要对其扰动区的最大扰动高度进一步地研究分析,从而为确定有厚度接触面单元厚度提供依据。为此,文中采用颗粒流模拟软件(partical flow code, PFC)建立剪切试验数字模型。

2 接触面厚度模拟分析

2.1 模型的建立

PFC模拟单剪试验过程大致如下,为方便起见,采用方形截面来替代圆形截面,模型尺寸为 $40\text{ cm} \times 40\text{ cm} \times 30\text{ cm}$ 。上盒由3部分组成:左右两边采用2个wall单元;沿剪切方向的前后2个面采用2排ball单元,其不同的高度处可以产生水平向的位移,但是不能产生垂直向的位移;由于2排ball单元可以产生水平向的位移,在法向荷载下试样因产生过大的变形而不能实现自平衡而无法计算,为此,在沿试样高度方向设置几道箍圈,每一道箍圈由若干个ball单元组成,可以整体水平向移动,但是箍圈本身因具有较大的强度和刚度而不能产生变形,这刚好可以实现单剪试验中单剪片的功能,剪切试验模型如图7所示。

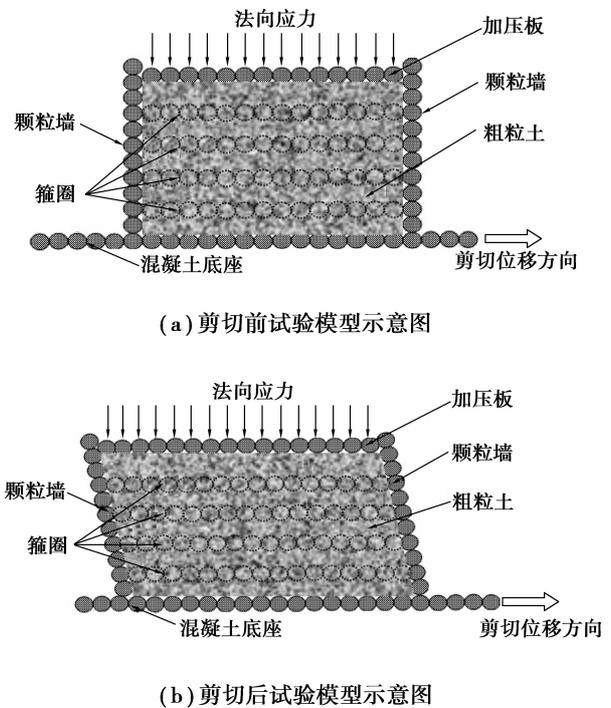


图7 PFC颗粒流数值模型剪切试验示意图

采用扩大平均粒径法,同时通过最大最小粒径比的控制使数值试样的级配(不均匀系数和曲率系

数)接近于实际土料。根据试验条件,采用均匀分布法生成单剪试样颗粒集,生成的单剪试样颗粒集如图 8 所示。图中自下而上数字 1,2,3,⋯,13,14,15 表示不同位置的特征点。

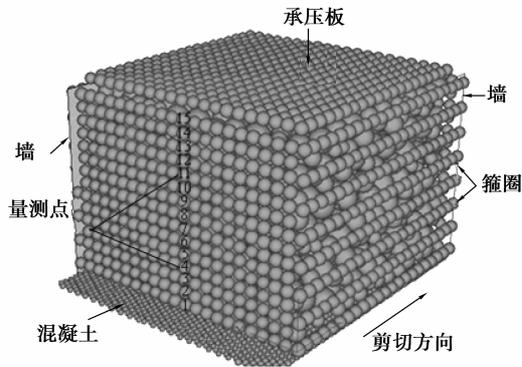


图 8 PFC3D 剪切模型

2.2 模型参数的确定

结合剪切试验结果,对其各组细观参数进行确定,包括参数的调整、优化,在此基础上,采用模型参数对试验进行数值模拟分析。

如图 8 所示的模型中,左右 2 个墙为刚体,其与粗粒土的摩擦系数设为 0.01,顶板为刚性加载板,摩擦系数同样设为 0.01;底板为混凝土,采用平行粘接模型,颗粒间的摩擦系数为 0.35;粗粒土采用接触模型,颗粒之间的摩擦系数设为 0.5,孔隙率为 0.35;前后 2 排颗粒墙以及箍圈均采用平行粘接模型。

泥皮采用粘接模型,厚度为 20 mm,泥皮颗粒之间的摩擦系数设为 0.15,孔隙率为 0.3。单剪试验颗粒集参数详见表 1。表中, K_n 、 K_s 分别为球颗粒的法向和剪切刚度, K_{pn} 、 K_{ps} 为平行粘接模型的法向与剪切刚度, Γ_{pn} 、 Γ_{ps} 为平行粘接模型的法向与剪切强度, Γ_{bn} 与 Γ_{bs} 为粘接模型的法向与切向强度。模拟试验法向压力与剪切速率与室内试验一致。

表 1 单剪试验颗粒集参数

编号	$K_n /$ ($N \cdot m^{-1}$)	$K_s /$ ($N \cdot m^{-1}$)	$K_{pn} /$ ($N \cdot m^{-3}$)	$K_{ps} /$ ($N \cdot m^{-3}$)	Γ_{pn} / Pa	Γ_{ps} / Pa	Γ_{bn} / N	Γ_{bs} / N
墙体	10^{15}	10^{15}	—	—	—	—	—	—
前板	10^8	10^8	10^{15}	10^5	10^{13}	10^5	—	—
后板	10^8	10^8	10^{15}	10^5	10^{13}	10^5	—	—
顶板	10^{10}	10^{10}	10^{20}	10^{20}	10^{20}	10^{20}	—	—
底板	10^8	10^8	10^{12}	10^{12}	10^{20}	10^{20}	—	—
箍圈	10^{10}	10^{10}	10^{15}	10^{15}	10^{20}	10^{20}	—	—
粗粒土	5×10^6	5×10^6	—	—	—	—	—	—
水泥土泥皮 5%	5×10^4	5×10^4	—	—	—	—	10^4	10^4
水泥土泥皮 10%	10^5	10^5	—	—	—	—	3×10^4	3×10^4
水泥土泥皮 20%	3×10^5	3×10^5	—	—	—	—	5×10^4	5×10^4

2.3 模型结果分析

通过对试样内部特征点在剪切过程中运动状态的追踪,直接得出试样内部扰动高度,从而确定接触面的厚度结果,如图 9 所示。方案 1~方案 3 与图 6 一致,方案 4 代表无泥皮的情况,最大粒径

均为 2 cm;基于方案 2,分析了粗粒料的最大粒径对扰动的影 响,最大粒径为 1 cm、6 cm 及 8 cm 分别对应于方案 5、方案 6 及方案 7。 σ_n 表示法向应力。

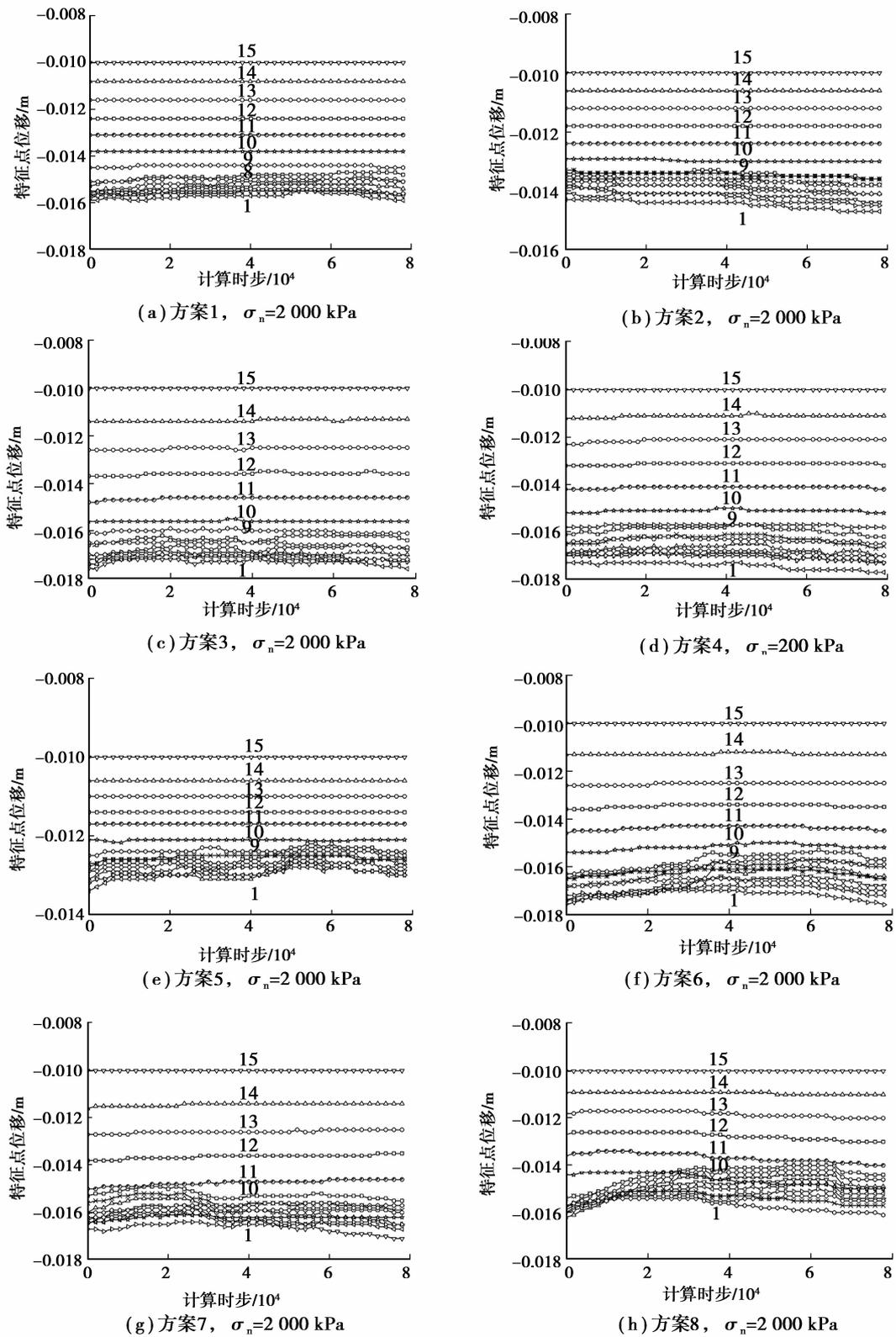


图 9 试样特征点水平位移变化过程曲线

图 9(a)~9(c)表明,随着水泥土泥皮水泥含量的增大,试样内部的扰动高度也逐渐增大,当水泥含

量为 5%(对应于方案 1)时,扰动区的高度在第 8 颗粒位置,即 16 cm(每颗球直径为 2 cm),当含量为 20%

时,扰动高度达到 18 cm,不难理解,随着水泥含量的增大,此时接触面逐渐向粗粒土与混凝土接触面过渡;而由图 9(e)可知,无泥皮时(粗粒土与混凝土接触),试样内部的扰动高度在第 9 颗球附近,即 18 cm,可见随着含量的不断增大,其扰动高度变化不大。由 9(b)及 9(d)可知,水泥土泥皮条件下,法向应力的的大小只对同高度处位移的大小有影响,对试样的扰动的高度影响不大。

相同法向应力下,不同最大粒径的试样在剪切过程中扰动情况如图 9(f)~9(h)所示。可以看出,试样的最大粒径对试样的扰动高度有一定的影响,最大粒径为 1~2 cm 时,试样的扰动高度为 16 cm,当最大粒径为 6 cm 时,试样扰动高度到达 20 cm;当粒径为 8 cm 时,试样的扰动高度到达第 10 个球,波及第 11 个球,但是变化量不大,基本上维持在 20 cm 附近,再往上变化较小,基本上可以忽略。由此可见,相同高度处,粒径大小不但对水平位移量值有影响,而且粒径在一定范围内对试样的扰动高度有影响。试验范畴内,扰动区高度一般在 16~20 cm 之间,粒径较大时,扰动高度约为其颗粒最大粒径的 3~4 倍。

值得注意的是,试样的扰动区高度与土体的级配、密度、颗粒的形状以及排列方式等因素也有很大的关系,这有待更进一步的研究。

3 结 论

采用大型单剪仪,进行了粗粒土与结构面在水泥土泥皮条件下的剪切试验,揭示了水泥土泥皮接触面力学特性。结合试验结果,采用 PFC 颗粒程序对试样内部剪切带的最大厚度进行了模拟分析,通过对试样内部不同高度处特征点的水平位移的实时跟踪,分析了剪切过程中试样内部土体的扰动区的范围,进而为薄层单元的厚度确定提供依据。

1)水泥土泥皮下,剪应力与剪应变的曲线关系表现出明显的应力应变软化现象以及剪胀现象,峰值强度所对应的剪应变的大小与法向应力及水泥含量有关。法向应力越大,其峰值所对应的剪应变就越大;水泥含量越大,相应的剪应变亦越大。剪胀产生在峰值强度之前。

2)水泥土泥皮条件下接触面的力学结果表明,水泥含量对剪切强度有重要影响,水泥含量越大,对接触面的强度也就越大,但对剪应变与剪应力以及剪应变与法向应变等力学响应特性没有影响。

3)剪切破坏时,在同一法向应力下,相同高度处的切向位移与剪切强度密切相关,强度越大,相应的

切向位移也就越大,这与其剪应力与剪位移的关系曲线具有一致的规律。此外,法向应力越大,对应的切向位移也相应越大。

4)PFC 数值试验结果表明,剪切过程中,试样内部的扰动高度具有一定的范围,其高度及程度与粗粒土最大粒径、法向应力以及接触面的接触特性(有无泥皮)等有密切关系。试验范畴内,试样的扰动高度在 18 cm 附近,粒径较大时,约为最大粒径的 3~4 倍。也就是说接触面的厚度可以取这一值。

参考文献:

- [1] Clough G W, Duncan J M. Finite element analyses of retaining wall behavior [J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1971, 97 (12): 1657-1673.
- [2] Brandt J R T. Behavior of soil concrete interfaces[D]. Edmonton, Canada: University of Alberta, 1985.
- [3] Kishida H, Uesugi M. Tests of the interface between sand and steel in the simple shear apparatus [J]. Geotechnique, 1987, 37(1):45-52.
- [4] Gens A, Carol I, Alonso E E. An interface element formulation for the analysis of soil-reinforcement interaction [J]. Computers and Geotechnics, 1989, 7(1/2):133-151.
- [5] 张嘎, 张建民. 夹有泥皮粗粒土与结构接触面力学特性试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(9): 1374-1378. ZHANG Ga, ZHANG Jianmin. Experimental study on behavior of soil-structure interface with slurry [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(9):1374-1378.
- [6] Fakharian K, Evgin E. Elasto-plastic modelling of stress-path-dependent behavior of interfaces [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2000, 24(2):183-199.
- [7] Frost J D, DeJong J T, Recalde M. Shear failure behavior of granular-continuum interfaces [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2002, 69 (17): 2029-2048.
- [8] Hu L M, Pu J L. Testing and modeling of soil-structure interface [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004, 130(8):851-860.
- [9] Said I, Gennaro V D, Frank R. Axisymmetric finite element analysis of pile loading tests [J]. Computers and Geotechnics, 2009, 36(1/2):6-19.
- [10] Dove J E, Jerrett J B. Behavior of dilative sand interfaces in a geotribology framework [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2002, 128(1):25-37.
- [11] Zeghal M, Edil T B. Soil structure interaction analysis:

- modeling the interface [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2002, 39(3):620-628.
- [12] Matsuoka H, Sakakibara K. A constitutive model for sands and clays evaluating principal stress rotation[J]. Soils and Foundations, 1987(1):73-88.
- [13] DeJong J T, Westgate Z J. Role of overconsolidation on sand-geomembrane interface response and material damage evolution[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2005, 23(6): 486-512.
- [14] Kishida H, Uesugi M. Tests of the interface between sand and steel in the simple shear apparatus [J]. Geotechnique, 1987, 37(1):45 - 52.
- [15] Miller G A, Hamid T B. Interface direct shear testing of unsaturated soil[J]. Geotechnical Testing Journal, 2007, 30(3): 182-191.
- [16] Edil T B, Bosscher P J, Sundberg A J. Soil-structure interface shear transfer behavior[C]// Proceedings of the Second Japan-U. S. Workshop on Testing, Modeling, and Simulation, September 8-10, 2005, Kyoto, Japan. New York: ASCE, 2005: 528-543.
- [17] Liu H L, Chu J, Deng A, et al. Use of large-diameter, cast-in situ concrete pipe piles for embankment over soft clay[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2009, 46(8): 915-927.
- [18] Shakir R R. Experimental study and numerical constitutive modeling of soil-concrete interaction[D]. Nanjing: Hohai University, 2009.
- [19] 殷宗泽, 朱弘, 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. Numerical simulation of the deformation in the interface between soil and structure material [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 16 (3):14-22.
- [20] 张治军, 饶锡保, 王志军, 等. 泥皮厚度对结构接触面力学特性影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(9): 2433-2438. ZHANG Zhijun, RAO Xibao, WANG Zhijun, et al. Experimental study on influence of slurry thickness on mechanical behavior of interface between gravel and concrete[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(9): 2433-2438.
- [21] 张嘎, 张建民. 粗粒土与结构接触面三维本构关系及数值模型[J]. 岩土力学, 2007, 28(2):288-292. ZHANG Ga, ZHANG Jianmin. Three-dimensional model of interface between structure and coarse grained soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28 (2): 288-292.
- [22] 张忠苗, 张广兴, 吴庆勇, 等. 钻孔桩泥皮土与桩间土性状试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(6):695-699. ZHANG Zhongmiao, ZHANG Guangxing, WU Qingyong, et al. Studies on characteristics of mudcake and soil between bored piles [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28 (6):695-699.
- [23] 彭凯, 朱俊高, 伍小玉, 等. 不同泥皮粗粒土与结构接触面力学特性实验[J]. 重庆大学学报, 2011, 34(1): 110-115. PENG Kai, ZHU Jungao, WU Xiaoyu, et al. Experiments on influence of slurry kinds on mechanical behavior of interface between gravel and concrete[J]. Journal of Chongqing University, 2011, 34 (1): 110-115.
- [24] Fleming I R, Sharma J S, Jogi M B. Shear strength of geomembrane-soil interface under unsaturated conditions[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2006, 24(5): 274-284.
- [25] 徐泳, 孙其诚, 张凌, 等. 颗粒离散元法研究进展[J]. 力学进展, 2003, 33(2):251-260. XU Yong, SUN Qicheng, ZHANG Ling, et al. Advances in discrete element methods for particulate materials[J]. Advances In Mechanics, 2003, 33(2): 251-260.
- [26] 周健, 池毓蔚, 池永, 等. 砂土双轴试验的颗粒流模拟[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(6):701-704. ZHOU Jian, CHI Yuwei, CHI Yong, et al. Simulation of biaxial test on sand by particle flow code[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22 (6): 701-704.
- [27] Thornton C, Zhang L. A DEM comparison of different shear testing devices [C]// Proceedings of the 4th International Conference on Micromechanics of Granular Media: Powders & Grains 2001, May 21-25, 2001, Sendai, Japan. [S. l.]: American Institute of Physics, 2001: 183-189.
- [28] 吴剑, 冯夏庭. 高速剪切条件下土的颗粒流模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(Sup1):3064-3069. WU Jian, FENG Xiating. Particle flow simulation of soil under high-speed shear [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27 (Sup1): 3064-3069.