

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2009.01.015

高塑性黏土与混凝土接触面剪切特性

徐泽友^{1 2}, 卢廷浩^{1 2}, 丁明武^{1 2}

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

2. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098)

摘要 :通过高塑性黏土与混凝土接触面大型单剪和直剪试验,研究了高塑性黏土与结构接触面的剪切应力-应变关系及强度参数.结果表明:单剪试验的剪应力-剪应变和直剪试验的剪应力-剪切位移呈双曲线关系,在对应垂直荷载作用下,直剪试验的抗剪强度大于单剪试验的抗剪强度,剪胀现象只在低垂直荷载时发生,且不明显.高塑性黏土达到抗剪强度后,在保持强度基本不变的情况下变形可以有很大的发展,表现出较强的变形适应能力和延展性能.

关键词 :高塑性黏土;混凝土;接触面;剪切特性;延展性能

中图分类号: TU411.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-1980(2009)01-0071-04

土质心墙堆石坝因其良好的防渗性和经济性,近年来在世界各国水利水电工程中得到广泛应用.20 世纪 90 年代以来,我国也加快了高土质心墙堆石坝的建设速度^[1].我国西南地区某水电站大坝拟建高度超过 300 m.该大坝采用混凝土防渗墙加灌浆帷幕进行防渗,防渗墙顶部插入黏土心墙中.为了防止混凝土防渗墙两侧因填土沉降不均匀产生裂缝^[2],考虑在防渗墙周围填筑高塑性黏土(图 1).高塑性黏土塑性指数较高,具有优良的压缩和适应大变形的特性^[3],在受剪切过程中能够延迟破坏的发生.工程应用中考虑了高塑性黏土的这种特殊性质.

高塑性黏土与混凝土的物理力学性质相差很大,需要通过试验来分析研究接触面的剪切特性^[4-5].笔者利用单剪和直剪试验进行了接触面的研究,其中单剪试验采用有厚度单元,直剪试验采用无厚度单元^[6].

1 试验方法

试验设备为河海大学研制的大型单剪直剪仪(DHJ-30),其基本结构形式和工作原理与常规直剪仪相似,试验土样直径为 300 mm.该设备配有计算机自动数据采集处理系统以及液压和电气操作控制柜.垂直加载系统分为低压和高压 2 个通道,可分别施加不同等级的压力.由计算机控制变频电机自动调速系统进行水平加载.垂直位移和水平位移测量均由光栅位移传感器完成,并通过计算机自动采集数据.

单剪试验时上层采用一系列光滑带滚珠的叠环,每个叠环厚 20 mm,内径为 300 mm.本次单剪试验实际使用 3 只叠环,因此试样总有效高度为 60 mm.直剪试验时土样高度取 50 mm.

本次试验采用某大坝工程心墙高塑性黏土.该高塑性黏土相对密度为 2.75,液限为 49%,塑限为 18%,试验中过 5 mm 筛.根据击实试验结果,最优含水量为 18%,最大干密度为 1.65 g/cm³.为接近工程实际,试样按含水量 18%配制,干密度按大于 1.64 g/cm³ 控制.

试验中的接触面为混凝土-高塑性黏土接触面,试验机下盒放置混凝土板,板面保持自然粗糙,上层为取自该拟建大坝工程高塑性黏土土样.单剪直剪试验采用 6 级法向压力,正应力 σ_n 分别取 100 kPa,200 kPa,

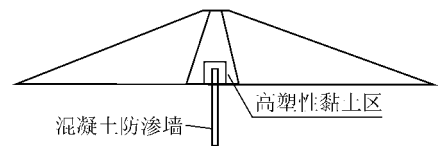


图 1 高塑性黏土区在心墙坝中的位置
Fig. 1 Position of highly plastic clay in a core wall dam

400 kPa 800 kPa 1 600 kPa 2 100 kPa.剪切速率设为 0.6 mm/min.在每级法向压力下先固结 3 h,固结基本稳定后保持法向压力不变并进行剪切试验,系统自动测读垂直位移、水平位移和水平剪力.

通过试验可以得到单剪试验接触面剪切错动带内剪应力 τ 与剪应变 γ 的关系以及直剪试验接触面上剪应力 τ 与剪切位移 δ 的关系.分别用单剪试验的 $\tau \sim \gamma$ 关系曲线和直剪试验的 $\tau \sim \delta$ 关系曲线表征接触变形的本构关系,从而可以得到该类土体与混凝土接触面的强度与变形特性.

2 单剪试验结果

2.1 剪应力与剪应变的关系

单剪试验的 $\tau \sim \gamma$ 关系曲线如图 2 所示.由图 2 可知: $\tau \sim \gamma$ 关系曲线与 σ_n 的大小有关, σ_n 越大,相同剪应变对应的剪应力亦越大,对应于每级 σ_n , $\tau \sim \gamma$ 关系曲线在初始阶段较陡,随后逐渐变缓并趋于水平,且水平段较长^[7].

2.2 正应力与最大剪应力的关系

通过试验可确定各级正应力 σ_n 下的破坏剪应力 τ_f ,其中破坏剪应力的值 τ_f 按应变为 0.45 时所对应的应力来取值.根据试验结果点绘的 $\sigma_n \sim \tau_f$ 关系曲线如图 3 所示.从图 3 拟合直线可得黏聚力 $c = 72.85 \text{ kPa}$, $\tan \varphi = 0.35$, $\varphi = 19^\circ$.

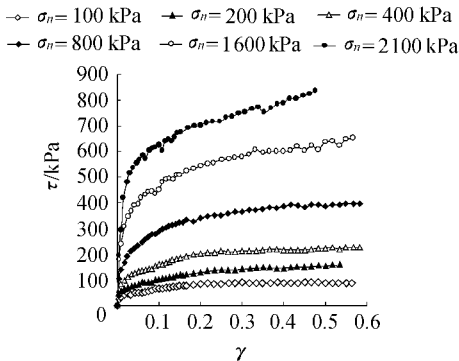


图 2 单剪试验的剪应力 τ 与剪应变 γ 的关系

Fig. 2 Relationship between shear stress τ and shear strain γ of simple shear tests

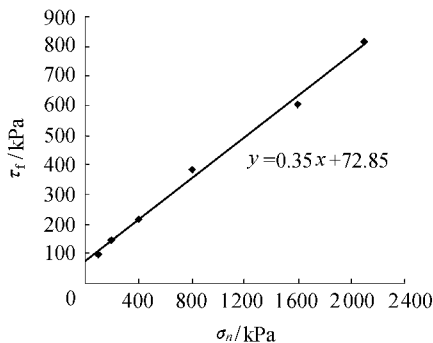


图 3 单剪试验的正应力 σ_n 与破坏剪应力 τ_f 的关系

Fig. 3 Relationship between normal stress σ_n and failure shear stress τ_f of simple shear tests

2.3 剪胀性

固结一结束就开始施加水平剪力并进行单剪试验,垂直位移清零并重新记录.试验过程中的水平位移与垂直位移的关系曲线如图 4 所示.

由图 4 可以看出,剪胀现象只在低 σ_n (100 kPa 和 200 kPa)下发生,而 100 kPa 应力下的剪胀现象要明显些,其他各级应力下均不会发生剪胀现象.

3 直剪试验结果

3.1 剪应力与切向位移的关系

剪应力与切向位移的关系如图 5 所示.

3.2 正应力与最大剪应力的关系

与单剪试验相似,确定出各级正应力 σ_n 下的破坏剪应力 τ_f ,如图 6 所示.

由图 6 中的拟合直线可得 $c = 61.72 \text{ kPa}$, $\tan \varphi = 0.5785$, $\varphi = 30^\circ$.

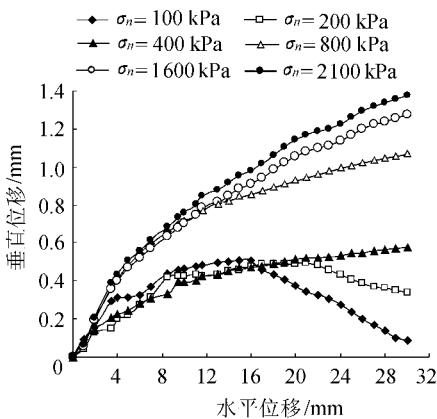


图 4 单剪试验的水平位移与垂直位移的关系

Fig. 4 Relationship between horizontal and vertical displacements of simple shear tests

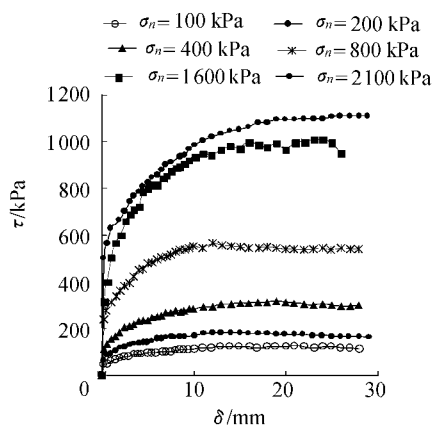


图 5 直剪试验的剪应力 τ 与切向位移 δ 的关系

Fig. 5 Relationship between shear stress τ and tangential displacement δ of direct shear tests

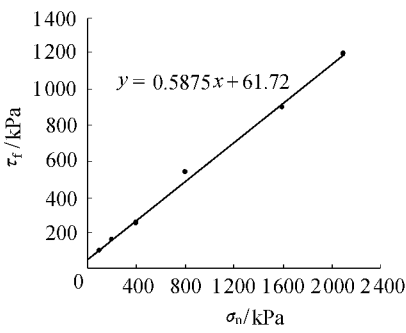


图 6 直剪试验的正应力 σ_n 与破坏剪应力 τ_f 关系的拟合曲线

Fig. 6 Fitting curve for relationship between normal stress σ_n and failure shear stress τ_f of direct shear tests

4 试验结果分析

4.1 $\tau \sim \gamma$ 关系曲线和 $\tau \sim \delta$ 关系曲线

对比图 2 和图 5 可知: $\tau \sim \gamma$ 关系曲线和 $\tau \sim \delta$ 关系曲线的形状都呈双曲线形^[8];土体所受剪应力在剪切初始阶段上升较快,随后缓慢上升;单剪试验曲线呈硬化现象,没有明显的软化现象,直剪试验有轻微的软化现象.单剪和直剪试验曲线水平段均较长,可见高塑性黏土在达到抗剪强度后,在强度基本保持不变的情况下变形可以有很大的发展,表现出较强的变形适应能力.两者的不同之处在于各级压力下直剪试验的剪应力的最大值总是大于单剪试验的剪应力最大值.因为单剪试验没有固定剪切面,剪切破坏可以发生在土体的最软弱面上,所以得到的抗剪强度较低,而直剪试验由于人为固定了剪切面,破坏面只能发生在土与结构的接触面上,因而得到的抗剪强度相对单剪要大一些.由此可见,在本试验所加的垂直压力下高塑性黏土土体内部的抗剪强度小于土与结构接触面的抗剪强度,而实际工程中并没有人为固定剪切面的位置,剪切破坏面只会发生在抗剪强度最弱的面上^[9],因而单剪试验结果更符合工程实际^[10].

4.2 $\sigma_n \sim \tau_f$ 关系曲线

对比单剪试验和直剪试验的 $\sigma_n \sim \tau_f$ 关系曲线可知,单剪试验的黏聚力大于直剪试验的黏聚力,而单剪试验的内摩擦角小于直剪试验的内摩擦角.如果将 2 条曲线画在一起,就能更清楚地看出这一点:直剪曲线对应的斜率大于单剪曲线对应的斜率,而如果延长 2 条曲线与 τ_f 轴相交,则单剪曲线的截距略大于直剪曲线的截距,如图 7 所示.这是因为单剪试验测得的是黏土内部的抗剪强度参数,直剪试验测得的是接触面上的抗剪强度参数.黏土颗粒小,颗粒之间的黏聚力大而咬合力小,接触面因表面粗糙不平,土与结构之间的黏聚力较小而咬合力较大^[11],所以会出现上述现象.单剪试验和直剪试验的抗剪强度表达式分别为

$$\tau_f = 0.3507\sigma_n + 72.85 \quad \tau_f = 0.5875\sigma_n + 61.72$$

令两式相等可解得 σ_n 值为 62 kPa.当 $\sigma_n < 62$ kPa 时,黏土内部的抗剪强度大于接触面的抗剪强度;当 $\sigma_n > 62$ kPa 时,接触面的抗剪强度大于黏土内部的抗剪强度,并且随着 σ_n 的增大,两者抗剪强度的差别也越来越大.所以,当 $\sigma_n > 62$ kPa 时,破坏将发生在黏土层内部;当 $\sigma_n < 62$ kPa 时,破坏将发生在接触面上.由于本次单剪试验垂直压力的起点是 100 kPa,所以单剪试验中观察不到破坏发生在接触面的现象.

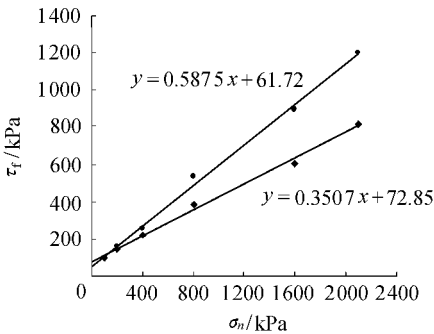


图 7 单剪和直剪试验的正应力 σ_n 与破坏剪应力 τ_f 关系的拟合曲线的比较

Fig. 7 Comparison of fitting curves for relationship between normal stress σ_n and failure shear stress τ_f of simple and direct shear tests

4.3 剪胀性分析

剪胀现象只在低 σ_n 下发生.这是因为在试验装样过程中,为了达到所要求的最大干密度而施加了相当程度的压实功^[11].在低 σ_n 试验的后半阶段,土体颗粒发生移位错动,黏聚势能和摩擦势能得以释放^[12],产生上抵力,因而体积产生微小的膨胀.而在较高 σ_n 试验中,由于黏聚势能和摩擦势能无法突破垂直压力的束缚,因而不能产生体积膨胀.对实际工程而言,由于高土质心墙坝土体内的垂直压力远大于试验所加荷载,因此不会产生剪胀现象.试验结果显示,该高塑性黏土在具备优良压缩性能和延展性能的同时,基本无剪胀性.

5 结 论

a. 单剪试验的 $\tau \sim \gamma$ 曲线和直剪试验的 $\tau \sim \delta$ 曲线均较好地符合双曲线形特征,单剪试验曲线呈硬化现象,而直剪试验曲线有轻微的软化现象.高塑性黏土以其优良的压缩性能和延展性能,能够延缓破坏的发生.即使在达到抗剪强度之后,仍能通过其自身的调整继续发挥一定的抗剪能力.

b. 在对应垂直荷载情况下,直剪试验的抗剪强度大于单剪试验的抗剪强度,而两者的黏聚力与内摩擦角的发挥则各有所长,其中,单剪试验的黏聚力大于直剪试验的黏聚力,而直剪试验的内摩擦角大于单剪试验的内摩擦角.抗剪强度的最终结果是由二者综合计算确定的.

c. 剪胀现象只在低 σ_n 下发生,且剪胀量很小,在 400 kPa 及以上的 σ_n 作用下,均观察不到剪胀现象.

d. 高塑性黏土具有较强的变形适应能力,填筑于大坝防渗墙周围可以防止裂缝的产生.

参考文献:

- [1] 余挺.砾质土防渗料在高土石坝上的应用[J].水电站设计, 2003(9):15-17.
- [2] 郭建设.惠州抽水蓄能电站黏土心墙堆石坝设计要点的探讨[J].水利规划与设计, 2004(4):48-50.
- [3] 李剑峰,葛和焰.高塑性黏土填筑高速公路路堤技术研究[J].铁道建筑, 2003(6):38-40.
- [4] 张嘎,张建民.大型土与结构接触面循环加载剪切切的研制及应用[J].岩土工程学报, 2003(2):149-153.
- [5] ARTHUR J R F, DUNSTAN T. The engineering application of direct and simple shear testing[J]. Geotechnique, 1988(4):651-652.
- [6] 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.
- [7] WROTH C P. The behaviors of normally consolidated clay as observed in undrained direct shear tests[J]. Geotechnique, 1987(1):37-43.
- [8] CLOUGH G W, DUNCAN J M. Finite element analysis of retaining wall behavior[J]. Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering Division, ASCE, 1971, 97(12):1657-1673.
- [9] SHIBUYA S, HIGHT D W. On the stress path in simple shear[J]. Geotechnique, 1987(4):511-515.
- [10] 张印丙,付建,李全明.散粒体材料间接接触面力学特性的单剪试验研究[J].岩土力学, 2004(10):1525-1526.
- [11] 卢廷浩,王伟,王晓妮.土与结构接触界面改进直剪试验研究[J].沈阳建筑大学学报, 2006(1):82-85.
- [12] 王伟.基于能量耗散原理的土与结构接触面模型研究及应用[D].南京:河海大学, 2006.

Shear properties at interface between highly plastic clay and concrete

XU Ze-you^{1,2}, LU Ting-hao^{1,2}, DING Ming-wu^{1,2}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 21098, China)

Abstract: Simple and direct shear tests on contact interfaces between highly plastic clay and concrete were performed to study the shear stress-strain relationship and strength parameters. The test results show that the relationship between τ and γ from the simple shear tests and that between τ and δ from the direct shear tests are hyperbolic. Under the same vertical load, the shear strength obtained from the direct shear tests is larger than that from the simple shear tests. The shear dilatancy occurs only at low vertical load and is not obvious. After reaching the shear strength, the highly plastic clay has large development of deformation while its strength basically keeps stable, showing high compressibility and high extensibility.

Key words: highly plastic clay; concrete; contact interface; shear characteristic; extensibility