

考虑土体密实度的钢-土界面剪切特性研究*

梁越^{1,2,3}, 卢孝志^{1,2,3}, 王晓龙^{1,2,3}, 栗维^{1,2,3}, 温雨眠^{1,2,3}

1. 重庆交通大学 国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074;
2. 重庆交通大学 水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074;
3. 重庆交通大学 河海学院, 重庆 400074)

摘要: 土体密实程度对内河码头大尺寸钢护筒嵌岩桩的承载性状具有重要的影响。在一定含水率及颗粒级配条件下, 控制试样土体干密度分别为 1.80, 1.85, 1.90 g/cm³ 进行土体与钢板的往复剪切室内试验, 探索了不同干密度条件下试样在不同法向应力条件下的剪应力-剪位移关系、极限剪切强度以及界面往复剪切的残余强度。研究发现钢-土界面的剪切过程主要有 3 个阶段: 弹性阶段、塑性阶段和破坏阶段; 极限剪切强度满足摩尔库伦准则且随干密度增大粘聚力和内摩擦角均增大, 且呈线性增加; 往复剪切过程中, 研究剪应力的变化情况发现同方向不同循环过程中最大剪应力几乎保持不变, 不同方向剪切循环过程中, 负方向剪应力均比正方向稍大。

关键词: 钢-土接触界面; 剪切特性; 干密度; 剪切强度; 往复剪切

中图分类号: U 655.54

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)04-0168-05

Research on shearing characteristics of steel-soil interface considering dense degree of soil

LIANG Yue^{1,2,3}, LU Xiao-zhi^{1,2,3}, WANG Xiao-long^{1,2,3}, LI Wei^{1,2,3}, WEN Yu-mian^{1,2,3}

1. National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;
2. Key Laboratory of Hydraulic and Waterway Engineering of Ministry of Education, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;
3. School of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: The dense degree of soil plays an important role in bearing behavior of large size rock-socketed filling pile with steel tube in the inland wharf. Contact interface shearing tests are carried out under certain conditions of moisture content and grain composition with different degree of dry density of samples. The relationship between the shear stress and displacement, limiting shear strength and residual strength of reciprocating shearing under different normal stress of different degree of dry density are studied. The results show that there are three stages during the shearing process of steel-soil interface including elastic stage, plastic stage and failure stage. The Mohr coulomb criterion is met by limiting the shear strength. Cohesion and internal friction angle are increased linearly with the increasing dry density. In the process of reciprocating shearing, the maximum shear stress remains unchanged of the same shearing direction in different circulations. However, the negative direction of shear stress is slightly larger than the positive direction of shear stress.

Key words: contact interface between soil and steel; shearing characteristics; dry density; shearing strength; reciprocating shearing

在桩基工程中, 各桩所承受的荷载由桩通过桩侧土及桩端土的抵抗力来承担。桩侧土的抵抗力又叫侧摩阻力, 产生于桩与其桩侧土的相对位移或相对位移趋势, 故桩的侧摩阻力不仅与桩土间位移有关, 还与土的性质、桩的刚度、时间因

素、桩土应力状态以及桩的施工方法有关。关于土与结构接触面已经有很多学者进行了研究, 取得了相当重要的成果: Potyondy^[1]通过直剪仪研究不同土体与界面接触的力学特性, 总结出影响接触面剪切特性的主要因素为: 土体性质、含水率、

收稿日期: 2013-08-19

*基金项目: 重庆交通大学研究生教育创新基金 (20130115)

作者简介: 梁越 (1985—), 男, 副教授, 主要从事大尺寸桩基承载性状方面的研究。

界面粗糙度以及法向应力; Uesugi^[2]用矩形单剪仪进行土与结构接触面的静力学和动力学研究; 殷宗泽等^[3]分析土与混凝土接触面上的剪切变形特征, 否定接触面上剪切变形与相对错动位移间的双曲线渐变关系, 提出刚-塑性变形的观点; 张明义^[4]研究了桩土滑动摩擦及其时效性; 张嘎等^[5-10]研究了一系列粗粒土与结构接触面的力学特性。

随着钢护筒嵌岩桩技术的逐渐采用, 对土与钢的界面接触特性的研究越来越受到重视, 已有的研究成果主要在于不同法向边界条件、不同加载路径, 以及时效性和循环荷载等对于钢土界面剪切特性的影响, 并没有系统地研究土体本身的物理性质对于钢土界面剪切特性的影响。考虑到在山区河流中为满足大水位变化条件下港口码头正常营运而采取钢护筒嵌岩桩结构形式, 本文选取重庆地区较为普遍的泥岩为研究对象, 在其他条件不变的情况下, 研究干密度对于钢-土接触界面剪切特性的影响。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验材料为纯泥岩, 所处地层为三叠系上统须家河组地层, 弱风化、呈紫红色, 泥岩物理指标见表1。取泥岩并经人工破碎(图1)。破碎完成后, 经标准圆孔筛网筛分得到所需粒组。试验中所选颗粒级配见图2, 其中级配指标: 不均匀系数 $C_u \geq 5$, 曲率系数 C_c 在 1~3, 属级配良好的土体。

表1 泥岩物理力学指标

材料	天然密度/($g \cdot cm^{-3}$)	饱和密度/($g \cdot cm^{-3}$)	土粒比重 G_s
泥岩	2.44	2.72	2.71



图1 试验材料

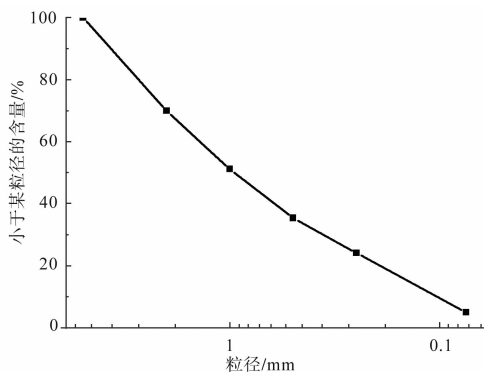


图2 级配曲线

1.2 试验方法

试验仪器为盒式剪切仪, 主要由剪切盒、加载系统和数据采集系统组成。剪切盒为长方体, 底部为正方形与钢界面接触, 盒内部尺寸为 10 cm × 10 cm × 20 cm, 为保证剪荷载作用下切盒的刚性状态, 箱体由 1 cm 厚钢板拼接而成且长边一侧中间处设置侧向变形肋。加载系统包括: 切向加载为 10 t 液压千斤顶, 行程 5 cm; 法向加载设备可提供 30, 40, 50, 60, 70 kPa 法向应力。数据采集系统包括压力传感器、位移传感器以及数据采集仪(图3)。

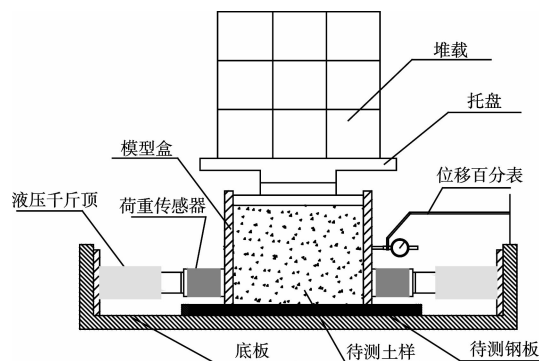


图3 钢土界面剪切特性试验示意图

本试验主要考虑干密度对钢土界面剪切特性的影响, 根据已有数据, 选取固定含水率为 8%、干密度分别为 1.80, 1.85, 1.90 g/cm^3 的制样, 法向应力分别为 30, 40, 50, 60, 70 kPa, 共计 15 组试验, 每组试样循环加载 5 次。具体步骤如下: 1) 为精确控制试样含水率, 配土前将所需粒组泥岩全部经烘箱烘干; 2) 根据所给级配曲线, 取土; 取土完成后拌匀, 加水再次拌匀; 3) 配土完成后, 密封 12 h 确保土体湿润均匀; 4) 试验

采取原位制样，即直接在钢板上制样；每次称取土样质量 1/3，加入剪切盒内且找平，然后用专用击实仪击实到控制深度，重复 3 次操作，相邻两次击实操作中土样表层打毛，避免土样分层；5) 制样完成后，调试数据采集系统，平衡测点。平衡完成后，进行法向加载；6) 为了减少法向应力条件下，土体固结对钢土界面剪切特性的影响。在法向加载完成后立即加载切应力，通过液压千斤顶施加荷载，直到压力传感器读数不随位移传感器的读数的增加而增大停止加压；7) 每个试样循环加载 5 次，记录数据。

2 结果分析

2.1 钢-土接触界面剪应力-位移关系

通过试验所得数据，做出干密度分别为 1.80, 1.85, 1.90 g/cm³，含水率均为 8% 的试样在法向应力分别为 30, 40, 50, 60, 70 kPa 下的 τ - u 的关系如图 4 所示，其中 τ 代表剪应力， u 代表切向位移。

对于 τ - u 关系曲线，以法向应力 30 kPa 为例：可以看出钢-土接触界面剪切过程中主要包含 3 个阶段：弹性阶段、塑性阶段和破坏阶段。弹性阶段剪应力随切向位移增大而迅速增加，呈线性，由图可看出该段直线斜率非常大，几乎表现为刚性；塑性阶段，随切向位移增大剪应力依旧增加，但增加逐渐减缓，界面发生屈服；破坏阶段中随切向位移增大剪应力达到极限，此时发生破坏且随后趋于稳定，不发生明显波动，并未出现应力软化情况。在法向应力从 30 kPa 增加至 70 kPa 过程中，钢-土接触界面 3 个阶段中最大剪应力均随之增大。

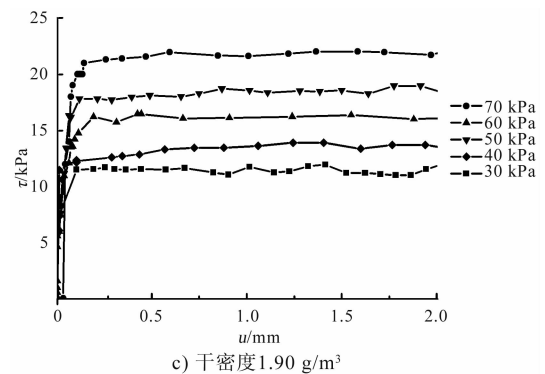
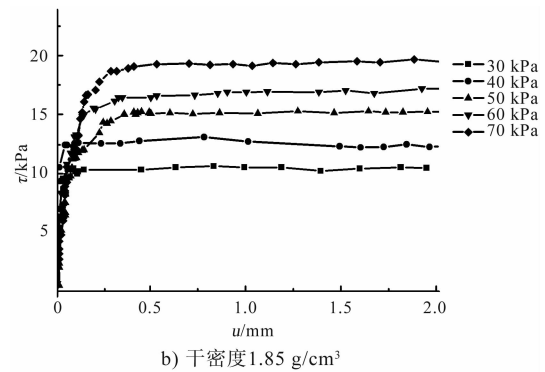
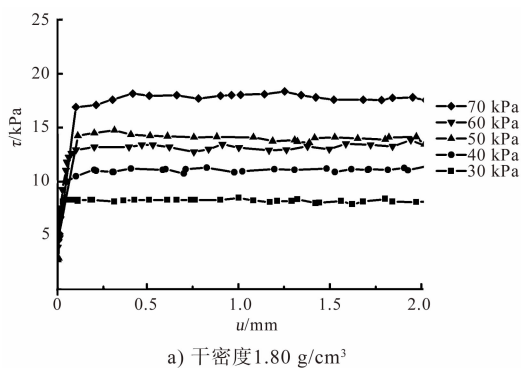


图 4 τ - u 关系

3.2 钢-土接触界面极限剪切强度

取图 4 中各个法向应力 σ 和最大剪应力 τ ，拟合出 τ - σ 曲线 (图 5)。

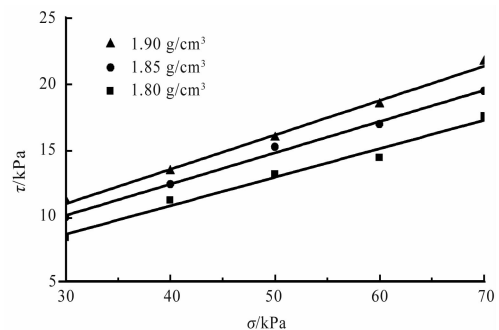


图 5 τ - σ 关系曲线

比较不同干密度情况下，极限剪切强度的变化关系：同一干密度下，切向应力和法向应力存在良好的线性关系，引用摩尔库伦准则：

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi \quad (1)$$

式中： c 为钢-土接触界面之间的粘聚力 (kPa)； σ 为施加的法向应力 (kPa)； φ 为钢-土界面的内摩擦角。

干密度由 1.80 g/cm³ 增至 1.90 g/cm³ 过程中，粘聚力由 2.33 kPa 变至 3.3 kPa，即随着干密度增大，粘聚力增大；通过摩尔库伦准则，反算出内摩擦角，

可看出随着干密度的增加,内摩擦角增大(表2)。

表2 干密度与粘聚力、内摩擦角关系

干密度 / (g·cm ⁻³)	c/kPa	φ/(°)
1.80	2.33	12.08
1.85	3.11	13.22
1.90	3.30	14.47

由表2得知:在干密度由1.80 g/cm³增至1.85 g/cm³的过程中,粘聚力c增加33.48%,内摩擦角φ增加9.44%;干密度由1.85 g/cm³增至1.90 g/cm³过程中,粘聚力c增加6.11%,内摩擦角φ增加9.46%。分别拟合粘聚力和内摩擦角关于干密度的曲线(图6,7),并给出公式。为检验公式合理性,另进行补充试验,即做含水率8%、干密度为1.75 g/cm³的剪切试验,反算出内摩擦角为10.76°、粘聚力2.05 kPa,同时由拟合公式计算出干密度为1.75 g/cm³时内摩擦角为10.87°、粘聚力为1.95 kPa,与实际值分别相差1.02%和4.88%。

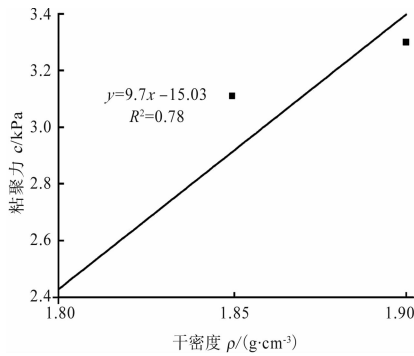


图6 粘聚力与干密度关系

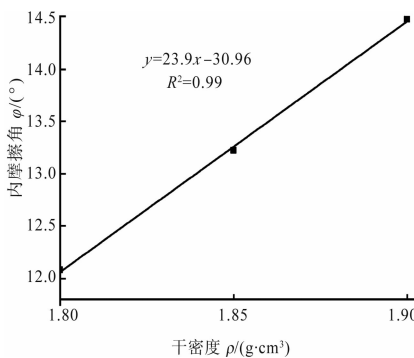


图7 内摩擦角与干密度关系

2.3 钢-土接触界面往复剪切特性

为研究不同干密度条件下,钢-土接触界面往复

剪切特性的变化情况,定义初次剪切①初始位移为0 mm,对应初始剪应力方向①所指的方向为正方向(图8)。选取法应力为50 kPa为例,分别做出3种干密度往复剪切下的应力-应变曲线(图9)。由图9可看出,同一干密度条件下,应力循环过程中同方向应力一位移曲线基本吻合,最大稳定剪应力基本相同,浮动变化可忽略;不同方向的应力一位移关系之间,应力稳定时稳定剪应力有一定的变化,负方向最大稳定剪应力均大于正方形最大稳定剪应力,3种干密度1.80,1.85,1.90 g/cm³正负方向最大稳定剪应力依次增加11.11%,6.25%,7.65%,即钢土界面剪应力表现出一定的接触面异向性;对于不同干密度条件下,均符合上述应力循环过程中应力-位移变化规律,但不同干密度之间,其剪应力稳定值随干密度的增大而增大,同时随位移增长过程中并未表现出应变软化规律。

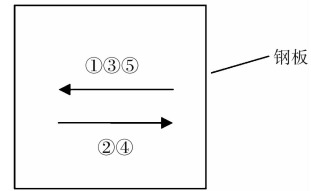
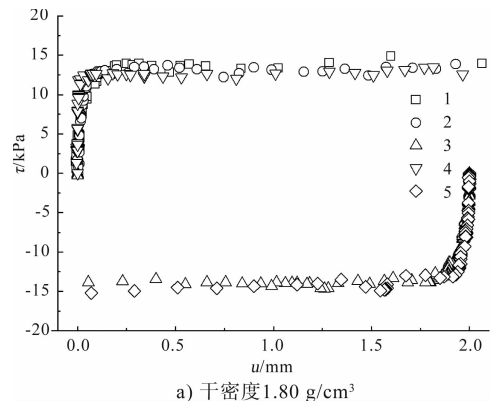
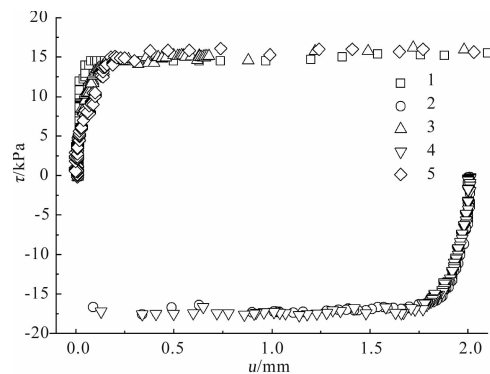


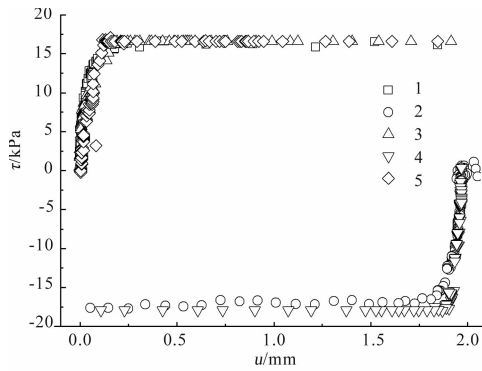
图8 往复剪切路径



a) 干密度1.80 g/cm³



b) 干密度1.85 g/cm³



c) 干密度1.90 g/cm³

图9 应力循环-应变关系

3 结论

通过上述试验,即固定含水率8%、固定级配条件下,控制试样干密度分别为1.80,1.85,1.90 g/cm³,研究钢-土接触界面剪切特性,得出如下结论:

1) 钢-土接触界面剪切过程由3个阶段组成:弹性阶段、塑性阶段和破坏阶段。弹性阶段剪应力随切向位移增大而迅速增加;塑性阶段,随切向位移增大剪应力依旧增加,但增加逐渐减缓,界面发生屈服;破坏阶段中随切向位移增大剪应力达到极限。

2) 在钢-土界面剪切特性试验中,钢-土接触界面的抗剪强度与其所受法向应力满足摩尔库伦准则,且随干密度的增加,土的粘聚力和内摩擦角均增大,呈线性增长。

3) 在循环剪切过程中,同方向不同过程中最大剪应力几乎无变化;不同方向剪切循环过程中,负方向剪应力始终比正方向剪应力稍大,稳定剪

应力表现出一定的接触异向性。本试验中,由于控制变量为干密度,土体自重也相应地随着干密度的变化而变化,这种变化对试验结果产生的影响有多大,值得研究。

参考文献:

[1] Potyondy J G. Skin friction between various soils and construction materials[J]. Geotechnique, 1961, 11(4): 339-353.

[2] Uesugi M. Frictional resistance at yield between dry sand and mild steel[J]. Soils & Foundations, Journ Japanese Society of Soil Mech & Found Engrg, 1986, 26(4): 139-149.

[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(3): 14-22.

[4] 张明义,邓安福. 桩-土滑动摩擦的试验研究[J]. 岩土力学, 2002(2): 246-249.

[5] 张嘎,张建民. 粗粒土与结构接触面单调力学特性的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2004(1): 21-25.

[6] 张嘎,张建民. 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(10): 1 175-1 179.

[7] 张建民,侯文峻,张嘎,等. 大型三维土与结构接触面试验机的研制与应用[J]. 岩土工程学报, 2008(6): 889-894.

[8] 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(2): 149-153.

[9] 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(9): 1 374-1 378.

[10] 张嘎,张建民. 循环荷载作用下粗粒土与结构接触面变形特性的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2004(2): 254-258.

(本文编辑 郭雪珍)

