

DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640X.2015.01.004

梁越, 储昊, 卢孝志, 等. 钢-土界面剪切规律时效性室内试验研究[J]. 水利水运工程学报, 2015(1):28-32. (LIANG Yue, CHU Hao, LU Xiao-zhi, et al. Experimental studies on time effect of shearing characteristics of steel-soil interface[J]. Hydro-Science and Engineering, 2015 (1):28-32.)

钢-土界面剪切规律时效性室内试验研究

梁越^{1,2}, 储昊^{1,3}, 卢孝志^{1,3}, 曾超^{1,3}

(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. 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; 3. 重庆交通大学 河海学院, 重庆 400074)

摘要: 钢-土界面时效性对研究钢护筒嵌岩桩的承载力具有重要意义。在总结前人研究成果的基础上,通过改进室内直剪试验,研究预压时间对钢-土接触界面剪切特性的影响。试验设计预压时间分别为0,1,2,4,6,17,24和48 h,探索不同预压条件下得到的钢-土界面在不同法向应力条件下受剪时的应力应变关系。通过引入摩尔-库伦准则,分析了剪应力与水平位移的关系、抗剪强度等随界面预压时间的变化,发现剪应力随水平位移的增加而增大并趋于稳定;随着预压时间的增加,摩擦角、黏聚力呈增大趋势,并在一定时间后趋于稳定;钢-土界面剪切的极限强度不仅与界面上的法向应力有关,还与界面预压的时间有关,极限剪应力随预压时间的增加有较明显的增长,当法向应力较小时界面极限剪应力的时效性越明显。

关键词: 钢-土界面; 剪切特性; 时效性; 承载力; 抗剪极限强度; 桩基工程

中图分类号: TU431

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2015)01-0028-05

在桩基工程中,桩侧阻力主要与桩土间界面的剪切特性有关。在成桩过程中,由于扰动等作用的影响,单桩承载力随时间延续而增长的现象称为时效性^[1-5]。时效性的本质是土体发生次固结,当土体超静孔隙水压力完全消散时,主固结完成。如果压力长时间继续施加,由于土的流变性而发生次固结会使土体继续压缩变密,所以抗剪强度会明显提高。钢护筒嵌岩桩嵌岩段以上一般为岸坡回填覆盖层,桩基在覆盖层内受到的侧阻力对钢护筒嵌岩桩的承载性能有较大的影响。覆盖层与桩身钢护筒之间钢-土界面剪切特性关系到此段桩基侧阻力的发挥。由于覆盖层一般在成桩后回填,覆盖层回填后钢-土界面的剪切规律随时间的变化发展规律研究可以为确定桩侧阻力的发展与变化提供依据。在现阶段,界面剪切规律的试验研究较多,如J.G.Potyondy^[6]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有土体性质、含水率、界面粗糙度及法向应力等。M.Uesugi^[7]用矩形单剪仪进行了土与结构接触面的静力学和动力学研究。殷宗泽等^[8]分析了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。张嘎等^[9-10]研究了一系列粗粒土与结构接触面的力学特性。而对界面剪切特性的时效性研究较少,相关研究较多见于沉桩后桩基承载性能的时效性研究,如张明义等研究了桩土滑动摩擦及其时效性^[11];寇海磊等^[12]利用光纤传感器技术研究了静压桩承载力时效性。

本文针对钢护筒嵌岩桩与回填覆盖层之间的相互作用问题,主要研究时效性对钢-土界面剪切特性的影响,分析钢-土界面剪切规律、抗剪强度等随时间变化的发展规律,确定基于界面剪切特性时效性的桩侧阻力计算原则。

收稿日期: 2014-07-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51409029);重庆市基础与前沿研究计划资助项目(cstc2013jcyjA30006);岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室开放研究基金资助项目(GH201303)

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

E-mail: liangyue2560@163.com

1 试验设计

1.1 试验材料

长江上游泥岩分布广泛,且开采出来的泥岩料常用于码头回填,故本文选取泥岩为试验土料。土料取自重庆港口,考虑到试验材料用于码头回填和打桩时对桩周土的扰动,为了与实际情况相符,土样采用重塑土,其制备方法是将土风干后进行筛分,按原状土样的含水量和干密度加水拌合、压实而成。对土样进行了基本的物理试验,测得土颗粒密度 2.72 g/m^3 ,塑限 21.2% ,液限 39.6% ,最大干密度为 1.92 g/m^3 。本文设计试样干密度 1.85 g/cm^3 ,含水率为 8% ,试样颗粒级配见图1。

1.2 试验仪器

试验仪器主要在现有直剪仪上进行改进,具体改进如下:在下剪切盒上放置钢板,钢板各边边长与下盒断面边长相同,厚 3 mm ,且在钢板上进行人工钻孔,孔位置与下剪切盒孔位置重合,并通过销钉将钢板固定于下剪切盒上且销钉高度与钢板面平齐,使得钢板在水平方向上与下剪切盒无相对位移,上、下剪切盒具体尺寸为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ (长 \times 宽 \times 高);钢板具体尺寸为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$;环刀内径 61.8 mm ,高 20 mm (见图2)。根据土工试验规范,直剪过程中最大水平位移为 6 mm ,相对于钢板平面而言,在整个剪切过程中,土样与钢板的接触面积不变,弥补了常规直剪中土样剪切面积逐渐缩小这一缺点。为了减小上剪切盒与钢板的摩擦,在上剪切盒涂抹聚四氟乙烯。

1.3 试验设计

采用应变控制式直剪仪研究时效性对钢-土界面剪切特性影响。试验采用快剪,转速为 12 r/min , 1 r 提供水平位移 0.2 mm ,即每分钟剪切位移为 2.4 mm 。试验中测力计读数达到稳定值或有明显后退时,表示试样已经剪损;随着法向压力的增大,达到最大剪切应力对应的剪切位移也随之增大。若测力计读数继续增加则剪切变形到结束为止,转轮每转动一圈对应记录下水平和竖向位移百分表读数。考虑预压时间对钢-土接触面剪切特性的影响,从施加法向应力到主固结完成时为第1段时间,由于泥岩的压缩性很小,而渗透性很大,因此受力固结稳定需要的时间很短,可以认为在法向应力施加完毕后一小段时间其固结变形就已完成。同时每隔 1 h 观察竖向百分表,发现其变化值小于 0.01 mm 后开始计算预压时间,也就是主固结完成后开始算预压时间为第2段时间;文中所提到的预压时间都是指第2段时间。设计预压时间分布为 $0, 1, 2, 4, 6, 17, 24$ 和 48 h ,每个预压时间完成后均做4组试验。考虑到桩后回填覆盖层厚度一般能达到 $15 \sim 20 \text{ m}$,其上覆盖层自重应力乘以静止土压力系数后达到 350 kPa 左右,所以设计法向应力为4级,分别为 $100, 200, 300$ 和 400 kPa ,预压法向应力与当级剪切过程中法向应力相同。为了防止预压过程中试样的水分蒸发从而影响含水率,剪切盒顶用湿润脱脂棉覆盖。

2 数据分析

2.1 应力-位移关系时效性

法向应力 300 kPa 时不同预压时间条件下的剪应力 τ 与水平位移 λ 的关系曲线见图3。可见,不同预压时间内,剪应力随水平位移的变化趋势一致,均为剪应力随水平位移的增加而增加,增加速度逐渐降低,最终

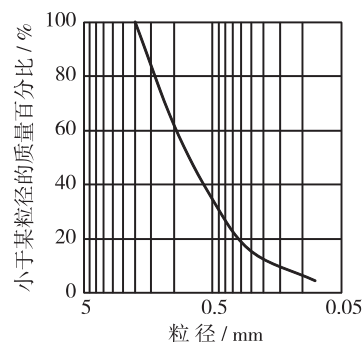


图1 颗粒级配曲线

Fig. 1 Particle size distribution

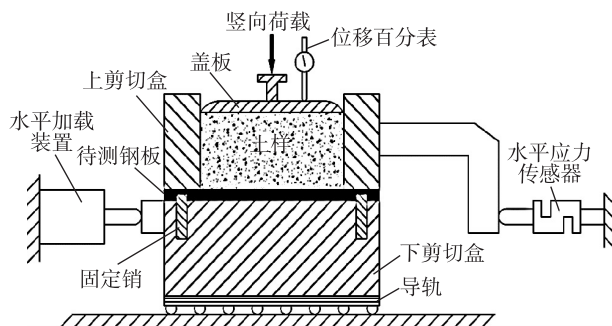


图2 剪切试验装置示意

Fig. 2 Equipment for the shearing test

保持稳定。不同预压时间下,0~6 h 的 5 条 λ - τ 曲线最大稳定剪应力相差不大,而 17~48 h 的 3 条曲线最大稳定剪应力相差较大,即预压时间对钢-土界面稳定剪应力有一定的影响。当预压时间较短时,影响不大,当预压时间大于 6 h 后,预压时间对稳定的剪应力影响较大。其他法向应力条件下的 λ - τ 关系也呈类似规律。

2.2 抗剪极限强度时效性

根据剪应力 τ 与方向应力 σ 关系,得到不同预压时间条件下的法应力 σ 和极限剪应力 τ_c 的关系曲线见图 4。由图 4 可见, σ - τ_c 关系曲线呈良好的线性关系,即试验得到的钢-土界面剪切强度符合摩尔-库仑准则。同时,图中 0~6 h 的 5 条强度曲线比较接近,说明在预压 6 h 内抗剪强度变化不明显;而 17~48 h 的 3 条强度曲线处于靠上位置,表明抗剪强度随预压时间的增长有了较明显的提高。不同法向应力条件下 t - τ_c 关系曲线见图 5,可清晰观察到在法向应力作用下,随着时间的增长极限剪应力增加趋势不同,出现各个时间段快慢不等,但在 24~48 h 时间段曲线的斜率明显减缓,说明在 24 h 后时效性作用在逐渐减小并趋于稳定。

如果以不同预压条件下的抗剪极限强度作为参考标准,在不同法向应力条件下,极限强度的累计增长率随着时间的变化关系见图 6。可以看出,极限强度随时间发展的增长曲线呈非线性,在预压时间较短时,极限强度提高不大,而预压时间在 10~20 h 时,极限强度有明显提高,当预压时间超过 24 h 后,极限强度的增长速度减小,极限强度值趋于稳定。极限强度的时效性同样受法向应力的影响,当法向应力较小时,界面剪切特性的时效性最明显;而随着法向应力的增加,界面剪切特性的时效性也趋于稳定。这说明覆盖层越厚,在 0~48 h 时间段的钢-土界面时效性不明显,抗剪强度累计增长不到 30%;而覆盖层越浅时效性越明显,在 0~48 h 抗剪强度累积增长达到 50%左右。

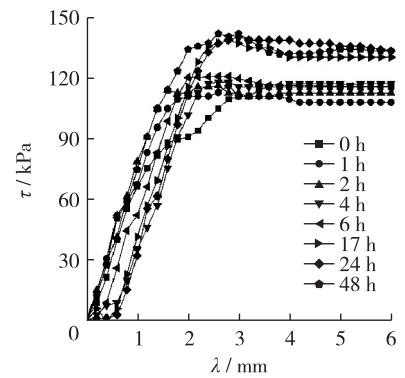


图 3 剪位移 λ 与剪应力 τ 关系曲线

Fig. 3 Relationship between λ and τ

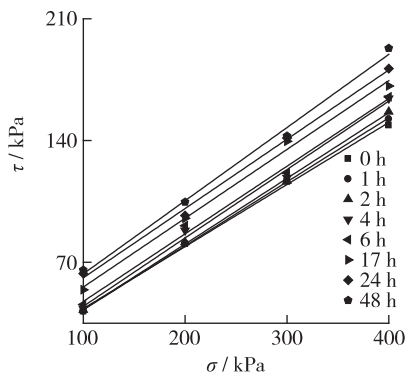


图 4 法向应力与极限剪应力关系

Fig. 4 Relationship between σ and τ_c

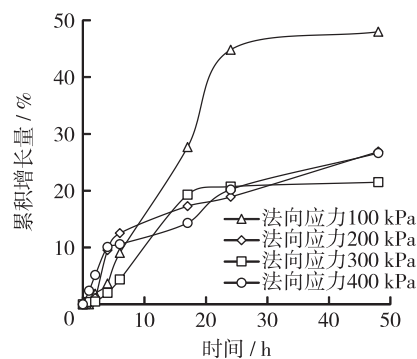


图 5 极限剪应力随时间变化曲线

Fig. 5 Variation curves of critical shear stress with time

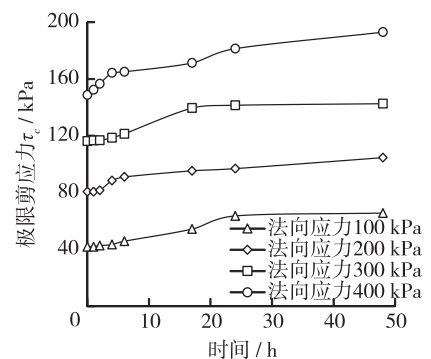


图 6 不同法向应力下的极限剪应力

Fig. 6 Increasing rate of the critical shear stress under different normal stresses

2.3 抗剪强度指标时效性

引用摩尔-库仑准则: $\tau = c + \sigma \tan \varphi$, 其中: c 为钢-土界面的黏聚力 (kPa); σ 为施加的法向应力 (kPa); φ 为钢-土界面的摩擦角 ($^\circ$)。根据图 4 数据直线拟合得出钢-土界面强度参数 c, φ 值随着时间的变化见表 1。

表1 预压时间与黏聚力、摩擦角关系

Tab. 1 Relationship between cohesion and friction

预压时间/h	黏聚力 c /kPa	摩擦角 φ /($^{\circ}$)	预压时间/h	黏聚力 c /kPa	摩擦角 φ /($^{\circ}$)
0	7.75	19.62	6	8.68	21.21
1	6.98	19.75	17	16.27	21.55
2	5.10	20.61	24	21.31	21.65
4	6.93	20.96	48	21.38	22.78

图7为 c, φ 值随时间的变化关系曲线,可以看出,随着预压时间的延长,黏聚力 c 呈非线性增加而内摩擦角 φ 呈线性增加。黏聚力 c 由无预压时的5 kPa增加至20 kPa以上,增加了3倍多;而内摩擦角也从 19.62° 增长至 22.78° ,增长率16.1%。

3 结 语

针对钢护筒嵌岩桩桩侧钢-土界面接触问题,对钢-土界面剪切特性的时效性开展了试验研究,探索了界面剪切过程中剪应力-剪位移、极限剪应力以及剪切强度参数等随界面预压时间的变化规律,主要结论有:

(1) 钢-土界面剪切过程中的应力-应变关系呈弹塑性,没有出现应变软化现象。随预压时间的不同,应力应变关系曲线仍然呈弹塑性并且曲线形态基本相同。

(2) 钢-土界面剪切的极限强度不仅与界面上的法向应力有关,还与界面预压的时间有关,极限剪应力随预压时间的增长有较明显的增长,当法向应力较小时界面极限剪应力的时效性越明显。

(3) 钢-土界面的抗剪强度符合摩尔-库伦准则;通过在不同预压时间内对黏聚力 c 和摩擦角 φ 进行拟合,发现随着预压时间的增加,在48 h前抗剪强度指标黏聚力 c 呈非线性增长而摩擦角 φ 呈线性增大。

(4) 当预压时间较短时,界面剪切特性的时效性不明显,而预压时间约6~17 h时时效性最明显,当预压时间继续延长时,界面剪切特性的时效性开始减弱,当预压时间超过24 h后,界面强度指标趋于稳定。可见,利用界面剪切试验探索长期桩侧阻力特性时,法向应力的预压时间应该在24 h以上,方能准确获得界面的剪切参数。

参 考 文 献:

- [1] 彭劼, 施建勇, 娄亮, 等. 考虑时效作用的桩基承载力计算方法研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(1): 118-124. (PENG Jie, SHI Jian-yong, LOU Liang, et al. Research on calculating pile's bearing capacity considering time-effect combining[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(1): 118-122. (in Chinese))
- [2] 罗战友, 王伟堂, 刘薇. 桩-土界面摩擦对静压桩挤土效应的影响分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(18): 3299-3304. (LUO Zhan-you, WANG Wei-tang, LIU Wei. Interface friction pile-soil compaction effect of static pressure piles of impact analysis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(18): 3299-3304. (in Chinese))
- [3] 郑刚, 任彦华. 桩承载力时效对桩土相互作用及沉降的影响分析[J]. 岩土力学, 2003, 24(1): 65-69. (ZHENG Gang, REN Yan-hua. Effects of time-effect of pile's bearing capacity on pile-soil interaction and on settlement of pile-raft foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(1): 65-69. (in Chinese))
- [4] 孙晓东, 宋可新, 张敬. 静压桩与土体间滑动摩擦及其时效性研究[J]. 河北工程大学学报, 2010(1): 40-43. (SUN Xiao-dong, SONG Ke-xin, ZHANG Jing. Study on sliding friction and time effect between jacked pile and soil[J]. Journal of Hebei University of Engineering, 2010(1): 40-43. (in Chinese))
- [5] 王戌平. 深厚软土中PHC长桩的时效性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2003(2): 115-117. (WANG Shu-ping. Study on time effect of PHC open-ended pile in deep soft soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003(2): 115-117. (in Chinese))

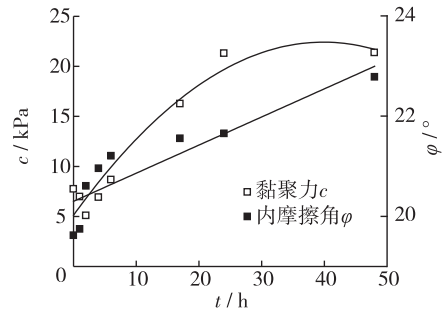


图7 黏聚力及内摩擦角与时间关系曲线

Fig. 7 Relationship between t , φ and c

Chinese))

- [6] POTYONDY J G. Skin friction between various soils and construction materials[J]. *Geotechnique*, 1961, 11(4):339-353.
- [7] UESUGI M, KISHIDA H. Frictional resistance at yield between dry sand and mild steel[J]. *Soils and Foundations*, 1986, 26(4): 139-149.
- [8] 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. (YIN Zong-ze, ZHU Hong, XU Guo-hua. Numerical simulation of the deformation in the interface between soil and structural material[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1994(3):14-22. (in Chinese))
- [9] 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. (ZHANG Ga, ZHANG Jian-min. Experimental study on monotonic behavior of interface between soil and structure[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2004(1): 21-25. (in Chinese))
- [10] 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): 1175-1179. (ZHANG Ga, ZHANG Jian-min. Unified modeling of soil-structure interface and its test confirmation[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2005(10):1175-1179. (in Chinese))
- [11] 张明义,时伟,王崇革,等.静压桩极限承载力的时效性[J].*岩石力学与工程学报*,2002(增2):317-320. (ZHANG Ming-yi, SHI Wei, WANG Chong-ge, et al. Time effect on the ultimate bearing capacity of static pressed pile[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002(Suppl2): 317-320. (in Chinese))
- [12] 寇海磊,张明义,刘俊伟. 基于光纤传感技术静压桩承载力时效性机理分析[J].*岩土力学*,2013(4):175-181. (KOU Hai-lei, ZHANG Ming-yi, LIU Jun-wei. Bearing capacity efficiency mechanism analysis of jacked pile based on optical fiber sensing technology[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013(4): 175-181. (in Chinese))

Experimental studies on time effect of shearing characteristics of steel-soil interface

LIANG Yue^{1,2}, CHU Hao^{1,3}, LU Xiao-zhi^{1,3}, ZENG Chao^{1,3}

(1. *National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China*; 2. *Key Laboratory of Geomechanics and Embankment Engineering, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China*; 3. *School of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China*)

Abstract: The time effect of the steel and soil interface is significant for study of the bearing capacity of the rock-socketed filling pile with steel tube. On the basis of summarizing the research findings of predecessors and by improving the indoor direct shear tests, a study is made of the shear properties of steel and soil interface which are influenced by preloading time. The preloading time is designed as 0, 1, 2, 4, 6, 17, 24 and 48 h in the tests and different preloading time is explored under the conditions of the steel-soil interface with relationships of the shear stress-strain which is affected by different normal stresses. Relationships between the shear stress and horizontal displacement, and the shear strength along with the change of interface preloading time are analyzed by the introduction of Mohr-Coulomb Failure Criterion. The shear stress is increased to a stable value with the increasing horizontal displacement; with the preloading time increasing, the friction angle and cohesive force increase, and after a certain period of time, tend to be stable. The limit of the steel-soil interface shear strength is not only related to the normal stress on the interface, but also related to the interface of the preloading time. Limiting shear stress increases with the increase of preloading time obviously; when the normal stress is lesser, the interface timing of the ultimate shear stress is more obvious.

Key words: contact interface between soil and steel; shearing characteristics; time effect; bearing capacity; ultimate shear strength; pile foundation engineering