DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2018.24.06.088

文章编号: 1006-6616 (2018) 06-0849-06

修正剑桥模型在 DPC 桩一土结构层中的应用分析

胡 贺 松¹, 廖 湘 英², 陈 晓 斌² (1. 广州市建筑科学研究院有限公司,广东 广州 510440; 2. 中南大学土木工程学院,湖南 长沙 410083)

摘 要: 针对 DPC 桩—土结构层开展大型直剪试验,基于试验分析,在考虑 DPC 桩—土结构层 注浆影响上引入临界应力比,构建了可描述应变软化的修正剑桥模型应力应变方程。直剪试验 表明 DPC 桩—土结构层剪切特性表现为剪切软化,具有明显的峰值强度和残余强度,呈现出明 显的结构性,其特征与超固结的黏土的剪切应力应变曲线特性类似。推导出的修正剑桥模型能 较好的解释实验结果,所得出的结论对 DPC 桩的设计有一定的指导意义。 关键词: 随钻跟管桩; 桩侧注浆; 桩—土结构层; 直剪试验; 剑桥模型

中图分类号: U43 文献标识码: A

THE APPLICATION OF MODIFIED CAM-CLAY MODEL IN DPC PILE-SOIL INTERFACE

HU Hesong¹, LIAO Xiangying², CHEN Xiaobin²

Guangzhou Institute of building science, Guangzhou 510440, Guangdong, China;
 School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China)

Abstract: A series of large direct shear tests were carried out for the DPC pile-soil structure layer. Based on the experimental analysis, the critical stress ratio was introduced considering the influence of DPC pile-soil layer grouting, and a modified cam-clay model which can describe the strain softening was constructed. The direct shear tests show that the shear behavior of DPC pile-soil structure layer is shear softening, with obvious peak strength and residual strength, and the structure layer shows structural properties. The results of these tests are well reflected in the modified Cam-clay model. The conclusion has guiding significance for the design of DPC piles.

Key words: Drilling with pre-stressed concrete Pile Cased; lateral pile grouting; pile-soil structure layer; direct shear test; cam-clay model

0 引言

建立合理的桩一土接触面本构模型是研究桩 基承载力的前提,特别是摩擦型基桩。在桩一土 接触面本构模型开发、改进和应用方面,常用的 接触面模型有理想弹塑性模型、指数函数模型、 双曲线模型、线性模型、损伤模型等。主要成果 有 Clough 和 Duncan^[1]提出的双曲线本构模型,后 来蒲诃夫^[2]、曹卫平^[3]等对双曲线模型进行了改 进。Brandt^[4]通过直剪试验提出了刚塑性模型。 Desai^[5]等将损伤力学的原理引入接触面,并提出

基金项目:广东特支计划资助项目 (2014TQ01Z014, 2015B020238014);国家自然科学基金 (5167082383) 作者简介:胡贺松 (1979-),男,工学博士,教授级高工,主要研究岩土工程施工。E-mail:hesonghu79@126.com 收稿日期: 2018-06-10;修回日期: 2018-10-10 吴芳编辑

了修正的 R-O 模型。胡黎明^[6]等则基于损伤力学 原理,提出了损伤本构模型。王伟^[7]从能量的角 度考虑,基于试验研究提出了3参数模型,为桩土 界面的计算提供了参考。李赛等[8]考虑桩—土界 面初始剪切刚度的深度效应,提出基于统计损伤 本构模型的无厚度接触面本构模型。张嘎^[9]基于 粗粒土与结构接触面弹塑性损伤静动力统一模型 建立了可用于有限元分析的弹塑性损伤接触面单 元。Chen^[10]、石熊^[11]对红黏土与不同粗糙度的混 凝土接触面的试验就模型开展了研究。Zheng et al^[12]将研究成果应用在了开挖卸载条件下的桩土 接触面上,此外还有 Ebrahimian and Bauer^[13], Kwak et $al^{[14]}$ 等。随着研究的深入,一些特殊条件 的研究也开始开展,比如动力荷载作用^[15]、温度 荷载影响^[16]、冻土作用^[17]。这些研究成果不断转 化为有限元计算平台的应用,比如 Yu et al^[18]。应 用实践表明:由于过度简化边界条件,这些模型 还存在一些不足。比如,弹塑性模型与刚塑性模 型虽能描述绝大多数的应力应变趋势,但同实际 的应力应变关系拟合精度比较低;指数模型对接 触面破坏之前的阶段拟合精度非常高,但不能描 述破坏后的软化趋势: 双曲线模型在超固结土的 适用性不强;损伤模型考虑了粗糙度对接触面的 影响,但模型内参数较多,使用不方便。

与传统 桩 型 不 同,大 直 径 随 钻 跟 管 桩 (Drilling with PHC Pile Cased Pile, DPC),是一种 跟进钻头施工的预制管桩^[19]。DPC 桩—土结构层 的特殊性主要表现为:桩土间空隙采用注浆结石 体填充,其桩—土结构层是由 2 个接触界面组成的 有限厚度结构层(以下称为 DPC 桩—土接触层)。 很明显,随钻跟管桩(DPC)是一种以发挥侧摩 擦阻力为主的端承摩擦桩,建立合理的 DPC 桩— 土结构层本构模型是 DPC 桩设计计算的关键问题。 基于试验分析和应用研究,尝试用修正剑桥模型 来描述 DPC 桩—土结构层应力应变关系。

1 结构层剪切特性试验分析

1.1 试验材料及方案

DPC 桩具有一种特殊桩一土结构层,其构造 如图1所示。该结构层较为复杂,存在多元介质, 离桩壁较近处浆液浓度较高,反之则较低,土与 浆液相互渗透,各参数难以定量描述。

为研究 DPC 桩一土结构层剪切特性, 开展了



图1 DPC 桩—土结构层示意图

Fig. 1 sketch of DPC pile-soil structural layer

注浆前后的结构层大型直剪试验研究。选用的试验材料包括:2种桩周土(粉质粘土和素填土)、注浆水泥浆液和模拟 DPC 桩表面的混凝土面板。

试验选用粉质粘土和素填土的物理性质指标 如表1所示,它们的粒径组成及级配曲线如图2 所示。

表1 试验土的基本物理力学参数值

Table 1 The fundamental physical and mechanical parameters of the tested soils

桩周土	最优含 水率/%	最大干密度/ (g・cm ³)	液限 <i>W_L</i>	塑限 W_P	粘聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)
粉质黏土	18.5	1.71	24.1	16.53	11.6	31
素填土	14.4	1.88	40.7	25.1	23.1	33





采用 TYJ-800 大型直剪仪开展 DPC 桩—土接 触层剪切试验,上剪切盒中试样尺寸为:500×500 ×150 mm³(见图 3a)。考虑 DPC 桩渗透注浆条件 下形成的特殊界面构造,采用预制混凝土板模拟 DPC 桩表面(代替下剪切盒),其上剪切盒中为压 实度为 95%的桩周土,采用涂抹方式模拟渗透注 浆结石体。注浆水灰比宜为 0.45~0.55,掺入 10% 硫铝酸钙膨胀剂和 3% 三乙醇胺早强剂。剪切试样制作完成后,养护时间为 7 天,形成了(注浆结石体—渗透了水泥浆液固化土层)接触层(见图 3b)。采用的正应力分别为 100、200 以及400 kPa,剪切速率为 1 mm/min。





1.2 剪切特性分析

从 DPC 桩一粉质黏土结构层应力应变曲线可 看出:①在未注浆的情况下位移强度曲线表现为 剪切硬化,没有明显的峰值强度点(见图 4a)。② 注浆后 DPC 桩—土结构层位移强度曲线具有明显 的峰值强度点和残余强度过程,呈现出明显剪切 软化特征,特别是在 100 kPa 和 200 kPa 正应力情 况下更加明显(见图 4b)。

从 DPC 桩一素填土注浆后结构层应力应变曲 线(见图 5)可以看出:注浆后结构层位移强度曲 线也具有明显的峰值点和残余强度过程,呈现软 化特征。

通过剪切试验表明:注浆加固后 DPC 桩—土 结构层剪切特性表现为剪切软化和结构性,具有 明显的峰值强度和残余强度。注浆后 DPC 桩—土 结构层剪切应力应变曲线特性与超固结的黏土的 剪切应力应变曲线特性类似^[20],可探索用改进后 的剑桥模型描述结构层的应力应变关系。



图 4 DPC 桩—粉质黏土结构层应力应变曲线 Fig. 4 Stress-strain curves of the DPC pile-silty

clay structural layer



图 5 DPC 桩—素填土结构层应力应变曲线 Fig. 5 Stress-strain curves of the DPC pile-plain fill structural layer

2 考虑注浆影响的屈服面

2.1 应力空间拓展

借鉴 Taylor 公式,首先将结构层二维应力问题 扩展为三维应力空间。直剪试验中土体的峰值强 度 Taylor 表达式为:

$$\tau A\dot{x} - \sigma' A\dot{y} = \mu \sigma' A\dot{x} \tag{1}$$

其中 τ 为剪应力, σ' 为正应力,A为剪切面积,x为 单位剪应变,y为单位轴向应变。

Andrew Schofield 和 Peter Wroth ^[21] 对上式进行 了重新类比定义,将 τ 定义为 q,σ' 定义为p,单位 剪应变 \dot{x} 定义为 \dot{e},\dot{y} 定义为 $-\dot{v}/v$,将二维应力转换 为三维应力空间下的强度关系,如公式(2) 所示。

$$\dot{q\varepsilon} + \dot{pv/v} = Mp \left| \dot{\varepsilon} \right|$$
(2)

其中, M 为临界应力比, p 为有效平均主应力, 即:

$$p = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \tag{3}$$

$$q$$
 为厂义剪应力、即:
 $q = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$
(4)

2.2 屈服函数

剑桥模型是土力学中经典本构关系,最初的 屈服函数为:

$$f = \ln \frac{p}{p_0} + \frac{q}{Mp} - \frac{\varepsilon_v^p}{c_p}$$
(5)

1968 年罗斯科等人提出了修正的剑桥模型,将屈服面定义为了椭圆面,屈服函数为:

$$f = c_p \ln \frac{p}{p_0} + c_p \ln \left(1 + \frac{q^2}{M^2 p^2} \right) - \varepsilon_v^p \qquad (6)$$

式中: $\varepsilon_{p}^{p} 为 p$ 轴方向上的塑性应变, p_{0} 为屈服面与 p 轴的交点, c_{p} 为材料参数, M 为临界应力比。为 了反映超固结土的应变软化, 很多学者改进了剑 桥模型, 比如 Nakai T^[22]、徐连民等^[23]引入了超 固结比来描述土体软化的情况。姚仰平等^[24]引入 Hvorslev 斜线, 将硬化后的屈服面定义为参考屈服 面, 原始屈服面定义为当前屈服面, 并引入超固 结参数 R 和潜在强度 M_{z} 来修正剑桥模型。

$$R = \frac{p}{\bar{p}_{x0}} \cdot \left(1 + \frac{q^2}{p^2 M^2}\right) \exp\left(-\frac{\varepsilon_v^p}{c_p}\right)$$
(7)

其中,当前屈服面的应力参数为 p_{xq}, p_{x0} 为参考屈服面的应力参数。

2.3 屈服面扩展

DPC 桩—土结构层注浆意味着 Roscoe 修正剑桥模型屈服面的同形扩展,如图 6 所示。

桩土结构层注浆后,引入注浆影响的临界应 力比系数来改进剑桥模型,使之能描述 DPC 桩土 结构层的应变软化。姚仰平等^[24]通过硬化参量来 代替剑桥模型使其能描述超固结土的屈服面。将 临界应力比系数定义为硬化参量,由此实现 DPC





桩--土结构层屈服面扩展,即注浆影响参量为:

$$l(\boldsymbol{\eta}) = \boldsymbol{\beta} \cdot \frac{\boldsymbol{M}_{z}^{4} - \boldsymbol{\eta}^{4}}{\boldsymbol{M}^{4} - \boldsymbol{\eta}^{4}}$$
(8)

考虑到屈服面与未注浆原始屈服面几何相似,故 注浆后 DPC 桩—土结构层的屈服函数可写为:

$$f = \ln \frac{p}{p_{0z}} + \ln \left(1 + \frac{q^2}{M^2 p^2} \right) - \frac{\int l(\eta) \, \mathrm{d} \varepsilon_v^p}{c_p} \qquad (9)$$

塑性应变与塑性势函数正交,总应力应变关 系为:

$$\begin{bmatrix} \mathrm{d}\boldsymbol{\varepsilon}_{v} \\ \mathrm{d}\boldsymbol{\varepsilon}_{d} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathrm{d}p \\ \mathrm{d}q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{pp} & D_{pq} \\ D_{qp} & D_{qq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathrm{d}p \\ \mathrm{d}q \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中

$$D_{pp} = \frac{c_p}{p} \cdot \beta \cdot \frac{(M^2 - \eta^2)^2}{M_z^4 - \eta^4} + \frac{1}{p} \cdot \frac{\kappa}{1 + e_0} (11)$$
$$D_{pq} = D_{qp} = \frac{c_p}{p} \cdot \beta \cdot \frac{(M^2 - \eta^2) \cdot 2\eta}{M^4 - \gamma^4} (12)$$

$$D_{qq} = \frac{c_p}{p} \cdot \beta \cdot \frac{4\eta^2}{M_z^4 - \eta^4} + \frac{2}{9} \cdot \frac{1}{p} \cdot \frac{1 + v}{1 - 2v} \cdot \frac{\kappa}{1 + e_0}$$
(13)

其中 λ_{κ}, e_0, v 为材料参数。

2.4 模型参数

采用实验数据,反演得到了修改剑桥模型应 力应变关系函数参数值,见表2所示。模型预测值 与实验值对比结果如图7所示:模型预测值与试验 结果吻合,可用改进后的剑桥模型描述结构层的 应力应变关系。

表 2 模型参数值

Table	2 Va	lues of	the r	nodel r	parameters
rabic	2 va.	ues or	the n	nouci p	Jarameters

DPC 桩一结构层	λ	κ	e_0	v	М	M_z	β	η
DPC 桩一粉质粘土	0.11	0.025	0.66	0.30	0.24	1.7	0.35	1.50
DPC 桩一素填土	0.12	0.021	0.58	0.25	0. 92	2.3	0.30	1.33



a-DPC 桩-粉质黏土结构层; b-DPC 桩-素填土结构层

图 7 模型预测与实验值对比 Fig. 7 Predicted stress-strain curves and tested stress-strain curves

3 结论

基于试验现象分析,在考虑 DPC 桩一土结构 层注浆影响上引入临界应力比,构建了可描述应 变软化的修正剑桥模型应力应变方程,并对实验 结果进行了拟合,所得结论如下:

(1) DPC 桩一土结构层剪切特性表现为剪切 软化,具有明显的峰值强度和残余强度,DPC 桩一土接触层具有明显的结构性,其特征与超固 结的黏土的剪切应力应变曲线特性类似。

(2) 基于临界状态比,引入考虑 DPC 桩—土 结构层注浆加固效应的参量,使其可描述 DPC 桩—土结构层屈服面扩展。

(3) 注浆后 DPC 桩一土结构层剪切应力应变 曲线特性具有结构性,可用改进后的剑桥模型描 述其应力应变关系。

参考文献/References

[1] Clough G W, Duncan J M. Finite element analysis of retaining wall behavior [J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1971, 97 (12): 1657 ~ 1672.

 [2] 蒲诃夫,郑俊杰,章荣军. 桩土界面荷载传递模型的改进 及其数值实现 [J]. 华中科技大学学报(城市科学版), 2010,27 (1):84~88.

> PU Hefu, ZHENG Junjie, ZHANG Rongjun. Improvement on the load transfer model of pile-soil interface and its numerical simulation [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Urban Science Edition), 2010, 27 (1): 84 ~ 88. (in Chinese with English abstract)

- [3] 曹卫平. 桩土界面荷载传递双曲线模型的改进及其应用
 [J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28 (1): 144~151.
 CAO Weiping. An improved load transfer hyperbolic model for pile-soil interface and its application [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28 (1): 144~151. (in Chinese with English abstract)
- [4] Brandt J R T. Behaviour of soil-concrete interfaces [D]. Alberta, Canada: The University of Alberta, 1985.
- [5] Desai C S, Ma Y Z. Modelling of joints and interfaces using the disturbed-state concept [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1992, 16 (9): 623 ~ 652.
- [6] 胡黎明, 濮家骝. 土与结构物接触面损伤本构模型 [J]. 岩土力学, 2002, 23 (1):6~11.
 HU Liming, PU Jialiu. Damage model of soil-structure interface
 [J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23 (1):6~11. (in Chinese with English abstract)
- [7] 王伟,卢廷浩.土与水工结构接触面模型研究 [J].水力水电学报,2012,31 (1):68~71.
 WANG Wei, LU Tinghao. Study on constitutive law of soil-hydraulic structure interface [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012, 31 (1):68~71. (in Chinese with English abstract)
- [8] 李赛, 汪优, 秦志浩, 等. 基于统计损伤本构模型的改进接触面模型研究 [J]. 铁道科学与工程学报, 2016, 13 (7): 1247~1252.

LI Sai, WANG You, QIN Zhihao, et al. Research on improved contact surface constitutive model based on statistical da mage constitutive model [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2016, 13 (7): 1247 ~ 1252. (in Chinese with English abstract)

[9] 张嘎,张建民.土与结构接触面弹塑性损伤模型用于单桩 与地基相互作用分析 [J].工程力学,2006,23 (2):72~ 77.

ZHANG Ga, ZHANG Jianmin. Elastoplastic damage model of soil-structure interface in single pile-soil interaction analysis[J]. Engineering Mechanics, 2006, 23 (2): 72 ~ 77. (in Chinese with English abstract)

- [10] Chen X B, Zhang J S, Xiao Y J, et al. Effect of roughness on shear behavior of red clay-concrete interface in large-scale direct shear tests [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2015, 52 (8): 1122 ~ 1135.
- [11] 石熊,张家生,邓国栋,等.循环荷载作用下红黏土与混凝

土接触面剪切特性试验研究 [J]. 铁道科学与工程学报, 2014, 11 (3): 88~93.

SHI Xiong, ZHANG Jiasheng, DENG Guodong, et al. Experimental research on shearing property of red clay-concrete interface under cyclic loading [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2014, 11 (3): 88 ~ 93. (in Chinese with English abstract)

- [12] Zheng G, Peng S Y, Ng C W W, et al. Excavation effects on pile behaviour and capacity [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2012, 49 (12): 1347 ~1356.
- [13] Ebrahimian B, Bauer E. Numerical simulation of the effect of interface friction of a bounding structure on shear deformation in a granular soil [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2012, 36 (12): 1486 ~ 1506.
- [14] Kwak C W, Park I J, Park J B. Dynamic shear behavior of concrete-soil interface based on cyclic simple shear test [J].
 KSCE Journal of Civil Engineering, 2014, 18 (3): 787 ~ 793.
- [15] Liu J K, Lv P, Cui Y H, et al. Experimental study on direct shear behavior of frozen soil-concrete interface [J]. Cold Regions Science and Technology, 2014, 104 ~105: 1~6.
- [16] Xiao S G, Suleiman M T, McCartney J S. Shear behavior of silty soil and soil-structure interface under temperature effects
 [A]. American Society of Civil Engineers Geo-Congress 2014
 [C]. Atlanta, Georgia: American Society of Civil Engineers, 2014.
- [17] 吕鹏,刘建坤,崔颖辉. 冻土 混凝土接触面动剪强度研究 [J]. 岩土力学, 2013, 34 (S2): 180~183
 LÜ Peng, LIU Jiankun, CUI Yinghui. A study of dynamic shear strength of frozen soil-concrete contact interface [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34 (S2): 180~183. (in Chinese with English abstract)
- [18] Yu Y, Damians I P, Bathurst R J. Influence of choice of FLAC

and PLAXIS interface models on reinforced soil-structure interactions [J]. Computers and Geotechnics, 2015, 65: 164 $\sim 174.$

[19] 唐孟雄.大直径随钻跟管桩的研制及工程化[J].广州建筑,2009,37(5):3~7.
 TANG Mengxiong. The development and engineering of drilling with PHC pipe cased pile [J]. Guangzhou Archtecture, 2009,

37 (5): $3 \sim 7$. (in Chinese with English abstract)

[20] 甄文战,孙德安,段博.不同应力路径下超固结黏土试样变形局部化分析 [J]. 岩土力学,2011,32 (1):293~298.
 ZHEN Wenzhan, SUN Dean, DUAN Bo. Analysis of strain

beam overconsolidated clay specimens along different stress paths [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32 (1): 293 ~ 298. (in Chinese with English abstract)

- [21] Schofield A N, Wroth P. Critical State Soil Mechanics [M]. London: McGraw-Hill, 1968.
- [22] Nakai T, Kikumoto M, Kyokawa H, et al. A simple method to consider density and bonding effects in modeling of geomaterials
 [A]. Wan R, Alsaleh M, Labuz J. Bifurcations, Instabilities and Degradations in Geomaterials
 [M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2011, 91 ~ 111.
- [23] 徐连民,祁德庆,高云开.用修正剑桥模型研究超固结土的变形特性[J].水利学报,2008,39(3):313~317.
 XU Lianmin, QI Deqing, GAO Yunkai. Study on characteristics of over-consolidated soils with modified Cam Clay Model [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(3): 313~317. (in Chinese with English abstract)
- [24] 姚仰平. UH 模型系列研究 [J]. 岩土工程学报, 2015, 37
 (2): 193~217.
 YAO Yangping. Advanced UH models for soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37 (2): 193~217. (in Chinese with English abstract)