

文章编号:1001-4179(2015)22-0035-05

基于 P_s 值的软土抗剪强度指标选取研究

——以武汉长江 I 级阶地为例

马 郎^{1,2}, 李 松¹, 徐光黎², 孙 盼¹

(1. 中南勘察设计院(湖北)有限责任公司, 湖北 武汉 430071; 2. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要:对武汉长江 I 级阶地多个典型基坑工程软土进行静力触探试验以及各种试验条件下的抗剪强度试验, 通过 500 多组试验数据分析了 P_s 值与抗剪强度指标之间的相关性, 得到了回归拟合曲线方程。结果表明, 武汉长江 I 级阶地软土抗剪强度指标与 P_s 值具有较好的相关性。利用 P_s 值根据拟合曲线方程计算各种试验条件下的抗剪强度指标, 同时使用有限元方法建立深基坑三维数值分析模型, 通过支护桩水平位移模拟值与实测值的对比分析, 得出使用三轴固结不排水抗剪强度指标更符合实测结果。所建立的回归拟合曲线方程为武汉长江 I 级阶地软土抗剪强度指标的获取提供了一个简单易行的方法。

关 键 词:软土; 深基坑; 静力触探试验; 抗剪强度指标; 武汉长江 I 级阶地

中图法分类号: P642

文献标志码: A

DOI:10.16232/j.cnki.1001-4179.2015.22.008

1 研究背景

基坑工程中对于抗剪强度指标的选取一直以来都是热点和难点问题。目前, 各地区均无法形成较为统一的观点。上海地区《基坑工程技术规范》优先规定按三轴固结不排水剪切试验测定的峰值强度指标取用^[1], 湖北省地方标准《基坑工程技术规程》推荐使用直接快剪强度指标^[2]。抗剪强度指标的合理选用是基坑工程安全和经济并行的基础, 对抗剪强度指标的选取研究具有重要的现实意义, 尤其对于深厚软土地区基坑工程。

国内许多学者进行过静力触探试验指标与其他物理力学指标相关性统计, 建立了统计关系式, 取得了一些成果^[3-8]。但对于武汉长江 I 级阶地软土, P_s 值与各种试验条件下抗剪强度指标之间的相关性研究甚少, 还尚未建立 P_s 值与抗剪强度指标之间的统计关系式。室内抗剪强度试验包含取样过程, 取样过程中对土体的扰动不可避免, 且扰动大小与取样方法相关, 并且

对于室内三轴试验, 试验过程复杂, 周期长, 较难获得三轴试验抗剪强度指标。相比其它原位试验, 静力触探试验具有仪器简单、操作方便、连续性好、数据可靠等优点, 并且广泛应用于岩土工程各个领域^[9-16]。因此, 建立 P_s 值与抗剪强度指标之间的统计关系式, 通过 P_s 值计算软土各种试验条件下的抗剪强度指标将会非常简便。

本文通过对武汉长江 I 级阶地多个典型基坑工程软土进行静力触探试验以及各种试验条件下的抗剪强度试验, 分析了 P_s 值与抗剪强度指标之间的相关性, 得到了回归拟合曲线方程, 并以武汉长江 I 级阶地软土深基坑工程为实例, 通过 P_s 值根据拟合曲线方程计算各种试验条件下的抗剪强度指标, 同时使用有限元方法建立深基坑三维数值分析模型, 通过支护桩水平位移模拟值与实测值的对比分析, 得到最为合理的抗剪强度指标试验方法, 为武汉长江 I 级阶地软土抗剪强度指标的获取提供一个简单易行的方法, 同时对抗剪强度指标试验方法的选择提供一定的依据。

收稿日期:2015-04-08; 修回日期:2015-07-10

基金项目:武汉市城建委科研项目(201223); 武汉市“黄鹤英才(专项)计划”资助项目

作者简介:马 郎, 男, 教授级高级工程师, 博士, 主要从事岩石工程勘察、深基坑工程设计与研究工作。E-mail:huwei_cumt@

2 软土静力触探与抗剪强度试验

对位于武汉长江 I 级阶地的中海国际大厦深基坑工程、环球国际贸易中心深基坑工程以及绿地 SOHO 深基坑工程项目场地软土目标地层进行原位静力触探试验及室内抗剪强度试验,其中原位静力触探试验使用单桥测试方法;软土使用静压薄壁取土器进行取样,室内抗剪强度试验方法包括直接快剪、固结快剪、三轴不固结不排水以及三轴固结不排水试验。通过以上试验获得软土 P_s 值及各种试验条件下的抗剪强度指标,为后续研究作铺垫。

3 软土 P_s 值与 c 、 φ 值相关性分析

根据大量试验数据,通过统计分析整理得到了武汉长江 I 级阶地软土抗剪强度指标与 P_s 值之间的线性拟合曲线及方程,由于篇幅受限,本文仅给出三轴固结不排水有效抗剪强度指标与 P_s 值拟合曲线图,见图 1~2,表 1 为抗剪强度指标与 P_s 值相关性汇总。从表 1 中可知,对于武汉长江 I 级阶地软土,各种试验条件下抗剪强度指标与 P_s 值之间具有较好的相关性,建立它们之间的统计关系式是可行的。

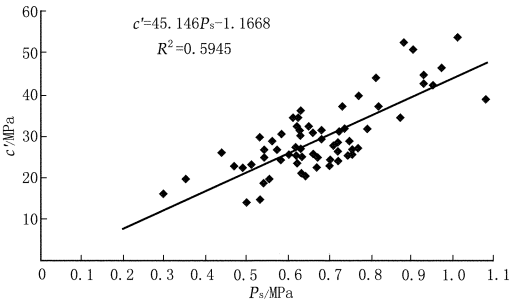


图 1 三轴固结不排水试验有效凝聚力与 P_s 值拟合曲线

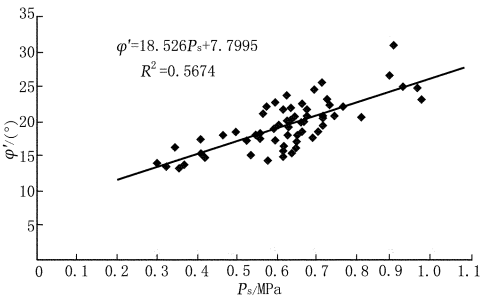


图 2 三轴固结不排水试验有效内摩擦角与 P_s 值拟合曲线

4 线性拟合曲线方程的应用

鉴于湖北省地方标准《基坑工程技术规程》(DB42/T159-2012)目前尚未给出淤泥、淤泥质土的有效应力指标,且总应力指标只提供了直接快剪强度指标,本文通过第 3 节所得到的线性拟合曲线方程计

表 1 抗剪强度指标与 P_s 值相关性汇总

指标	试验方法	样本数	线性拟合曲线方程	相关系数 R^2	相关程度
c 与 P_s	qq	54	$c = 21.723P_s - 0.2823$	0.502	显著
	cq	52	$c = 21.795P_s + 2.7052$	0.364	显著
	cu	75	$c' = 45.146P_s - 1.1668$	0.595	显著
	cu	75	$c = 33.443P_s + 2.7124$	0.322	显著
	uu	64	$c = 39.329P_s - 1.8048$	0.642	显著
φ 与 P_s	qq	54	$\varphi = 11.337P_s + 1.2457$	0.566	显著
	cq	52	$\varphi = 10.898P_s + 7.6700$	0.255	显著
	cu	75	$\varphi' = 18.526P_s + 7.7995$	0.567	显著
	cu	75	$\varphi = 9.5811P_s + 8.8779$	0.255	显著
	uu	64	$\varphi = 5.9579P_s - 0.0009$	0.539	显著

注: P_s 值为单桥静力触探测试结果,取值范围约为 0.2~1.1 MPa。其中 qq 为直接快剪试验,cq 为固结快剪试验,cu 为三轴固结不排水试验,uu 为三轴不固结不排水试验。本次所有拟合曲线样本数量范围为 52~75,样本数量越大,临界相关系数越小,当样本数量为 52 时,置信水平为 0.05 和 0.01 的临界相关系数分别为 0.273 和 0.354,而其平方值分别为 0.075 和 0.125,表中相关系数 R^2 数值均大于 0.125,所以相关程度为显著相关。

算了 P_s 值分别为 0.4、0.6 MPa 和 0.8 MPa 时对应的各种试验条件下的抗剪强度指标,见表 2。从表 2 可知,对于 qq 总应力指标,本文计算值稍大于规范建议值,主要原因可能是本文计算值来自静压薄壁取土器取样,对土样的扰动小;对于 cq 和 cu 总应力指标,二者数值较为接近,对摩擦角尤为明显;括号内数值给出的总应力指标和有效应力指标对基坑工程设计参数取值具有一定的参考价值。

表 2 淤泥、淤泥质土抗剪强度指标建议值

P_s /MPa	试验方法	总应力指标		有效应力指标	
		c /kPa	φ /($^\circ$)	c' /kPa	φ' /($^\circ$)
0.4	qq	10(8.4)	4(5.8)	—	—
	cq	(11.4)	(12.0)	—	—
	cu	(16.1)	(12.7)	(16.9)	(15.2)
0.6	qq	14(12.8)	6(8.0)	—	—
	cq	(15.8)	(14.2)	—	—
	cu	(22.8)	(14.6)	(25.9)	(18.9)
0.8	qq	16(17.1)	8(10.3)	—	—
	cq	(20.1)	(16.4)	—	—
	cu	(29.5)	(16.5)	(34.9)	(22.6)

注:表中括号外数值为现行湖北省地方标准 DB42/T159-2012 附录 B 提供,括号内数值为根据本文线性拟合曲线方程计算得到。

5 工程实例研究一

5.1 工程概况

某地产开发项目深基坑普挖深度约为 10.5 m,基坑采用排桩+混凝土内支撑以及局部双排桩的组合支护结构体系,被动区采用阶梯状加固,支护结构平面布置见图 3,工程地质典型剖面见图 4。

5.2 基于 P_s 值的抗剪强度指标计算

表 3 为各种试验条件下抗剪强度指标计算结果。

表 3 各种试验条件下抗剪强度指标计算

地层	P_s 值 / MPa	qq		cq		cu		uu	
		试验值	计算值	试验值	计算值	试验值	计算值	试验值	计算值
		c /kPa φ /(°)	c /kPa φ /(°)	c /kPa φ /(°)	c /kPa φ /(°)	c /kPa φ /(°)	c /kPa φ /(°)	c /kPa φ /(°)	c /kPa φ /(°)
2-1 淤泥	0.3	5.0 2.0	6.2 4.6	- -	9.2 10.9	- -	12.4 13.4	11.0 3.0	10.0 1.8
2-2 黏土	0.9	14.0 6.0	19.3 11.4	- -	22.3 17.5	- -	39.5 24.5	- -	33.6 5.4
3-1 淤泥质粉质黏土	0.5	8.0 4.0	10.6 6.9	- -	13.6 13.1	12.0 21.0	21.4 17.1	11.0 3.0	17.9 3.0
3-2 粉质黏土	1.0	19.0 9.0	21.4 12.6	- -	24.5 18.6	- -	44.0 26.3	- -	37.5 6.0

注:计算 c 、 φ 值通过表 1 中抗剪强度指标与 P_s 值的线性拟合曲线方程计算得到,试验值由勘察报告提供,“-”表示勘察报告没有提供该项指标。

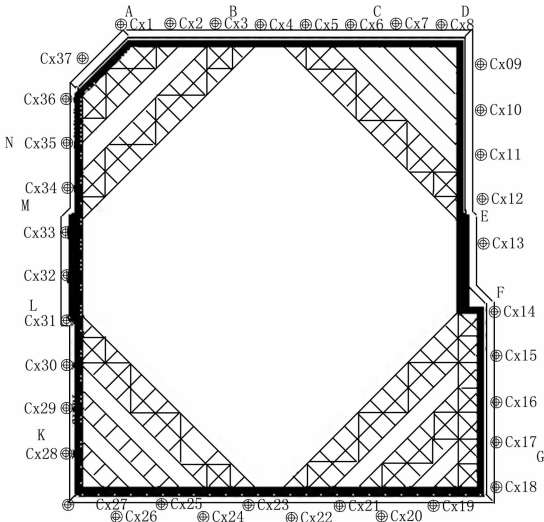


图 3 支护结构及监测点平面布置

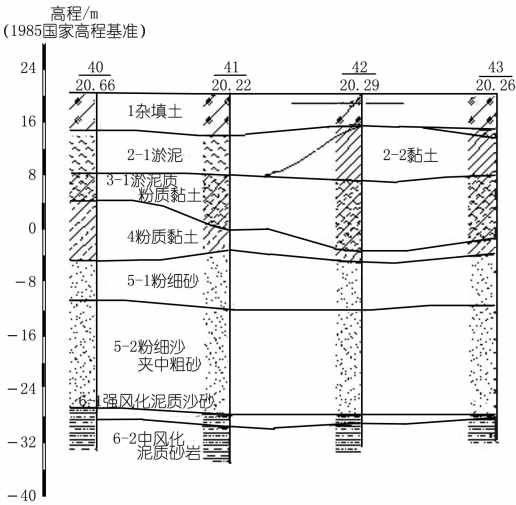


图 4 工程地质典型剖面

从表 3 中可知,对于 qq 试验条件抗剪强度指标,计算值普遍大于勘察报告提供的试验值,其主要原因是取样方法不同,勘察报告提供的 qq 强度指标使用岩芯管取样,而计算值使用的是静压薄壁取土器取样,显然后者对原状土的扰动小。同时该场地勘察报告还提供了部分地层的三轴固结不排水与三轴不固结不排水强度指标,可供参考与对比。

5.3 三维有限元模型

采用 MIDAS/GTS 三维有限元软件建立深基坑三

维数值分析模型,土体本构使用修正 M-C 模型,该模型与 Plaxis 中的 HS 模型类似,均可考虑土体的卸载特性,对于深厚软土基坑尤为适用,土体抗剪强度指标按表 3 中计算值取值,其它各项物理力学参数根据勘察报告取值,深基坑三维开挖有限元模型见图 5。

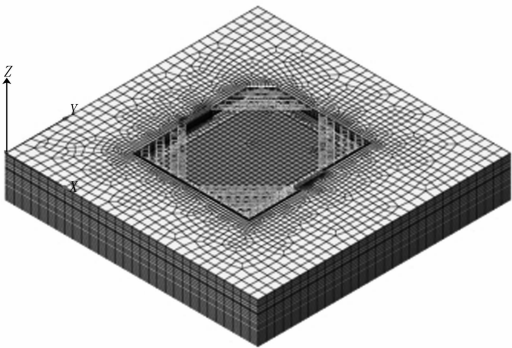


图 5 深基坑开挖三维数值分析模型

5.4 支护桩水平位移模拟值与实测值的对比

图 6 为各测点支护桩水平位移模拟值与实测值对比曲线。其中岩芯 qq 抗剪强度指标取自勘察报告, c_u 、 c_q 和 qq 抗剪强度指标根据表 1 中抗剪强度指标与 P_s 值的线性拟合曲线方程计算得到,其中 c_u 抗剪强度指标为有效应力指标。

从以上各测点支护桩水平位移模拟值与实测值对比曲线可得到以下结论。

(1) 岩芯 qq 抗剪强度指标情况下,围护桩水平位移模拟值普遍远大于实测值,一定程度上说明目前勘察报告提供的岩芯 qq 抗剪强度指标偏低,直接造成作用在围护结构上的土压力偏大。

(2) c_u 抗剪强度指标选取情况下,围护桩水平位移模拟值与实测值最为接近, c_q 次之。

6 工程实例研究二

6.1 工程概况

某房地产开发项目基坑普挖深度为自然地面下 9.40 m,基坑开挖面积约 5 000 m²,基坑周长约 280 m,深基坑采用一道圆环混凝土内支撑 + 排桩支护结构体

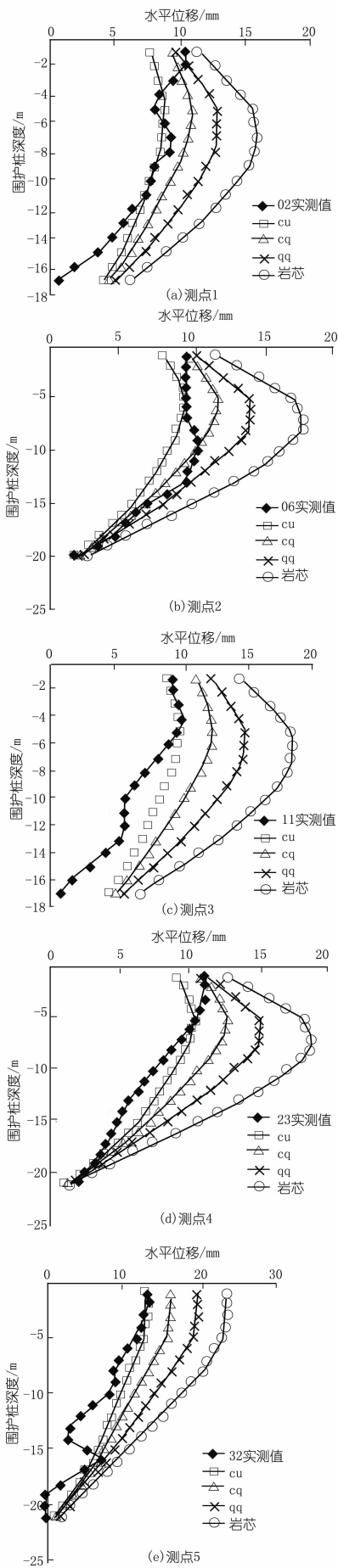


图 6 各测点支护桩水平位移模拟值与实测值对比曲线(实例一)

系,支护结构及监测点平面布置见图 7。

拟建场地位于长江冲积 I 级阶地,基坑开挖深度范围内土层力学性质较差,大部分为软弱土层。软土各种试验条件下抗剪强度指标的计算参照 5.2 节所述,在此不详细列出。

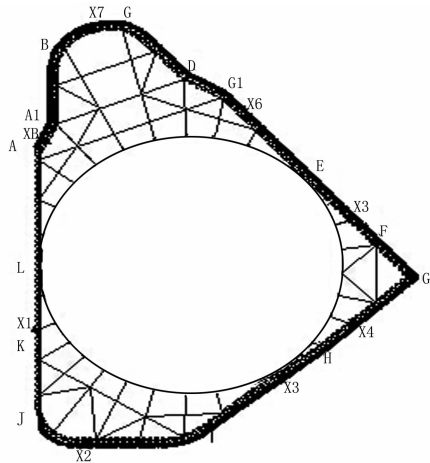


图 7 支护结构及监测点平面布置

6.2 支护桩水平位移模拟值与实测值的对比

图 8 为各测点支护桩水平位移模拟值与实测值对比曲线。从图 8 中各测点支护桩水平位移模拟值与实测值对比曲线可知,支护桩水平位移实测值与 cu 抗剪强度指标选取情况下的模拟值较为吻合,岩芯 qq 抗剪强度指标取值情况下模拟值偏大,这与本文工程实例一得到的规律基本一致。说明针对武汉长江 I 级阶地而言,通过软土各种强度指标与 P_s 值之间建立的统计关系式计算各种试验条件下的抗剪强度指标是可行的。

7 结论

本文对武汉长江 I 级阶地多个典型基坑工程软土进行静力触探试验以及各种试验条件下的抗剪强度试

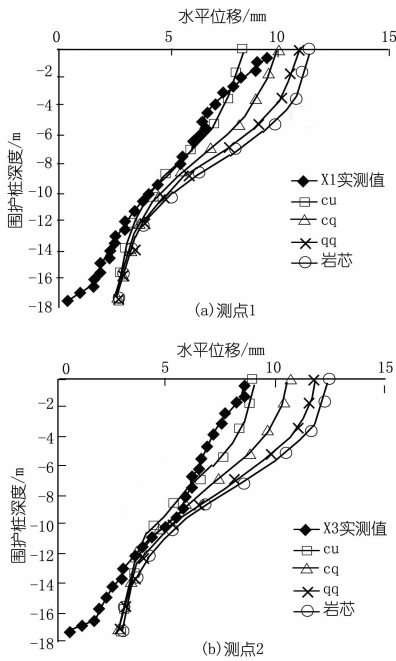


图 8 各测点支护桩水平位移模拟值与实测值对比曲线(实例二)

验,分析了 P_s 值与抗剪强度指标之间的相关性,得到了回归拟合曲线方程,并以武汉长江 I 级阶地软土深基坑工程为实例,通过 P_s 值根据拟合曲线方程计算各种试验条件下的抗剪强度指标,同时使用有限元方法建立深基坑三维数值分析模型,通过支护桩水平位移模拟值与实测值的对比分析,得到以下主要结论。

(1) 对于武汉长江 I 级阶地软土,各种试验条件下抗剪强度指标与 P_s 值之间具有较好的相关性,可根据本文所建立的抗剪强度指标与 P_s 值之间线性拟合曲线方程通过 P_s 值计算各种试验条件下抗剪强度指标,为岩土工程设计参数取值提供简便易行的方法。

(2) 填补了湖北地方标准《基坑工程技术规程》DB42/T159 - 2012 附录 B 中软土有效应力指标的空缺,并提供了直接快剪和固结快剪试验对应的总应力指标。该成果可为下一版湖北地方标准《基坑工程技术规程》DB42/T159 - 2012 的修编提供依据。

(3) 使用三轴固结不排水强度指标更符合支护桩实测水平位移,固结快剪强度指标次之,目前湖北地区普遍使用的直接快剪强度参数偏低,经济性较差。

(4) 由于取样和试验数量的限制,本文所建立的

抗剪强度指标与 P_s 值之间的线性拟合方程应在后续的研究中继续深化,应对武汉长江 I 级阶地进行更多的室内外土工试验,进一步减小统计误差,为今后的基坑工程抗剪强度设计参数的选取提供理论依据。

参考文献:

[1] DG/TJ08 - 61 - 2010 基坑工程技术规范[S]. 上海:上海市建筑建材业市场管理总站,2010.

[2] 中南勘察设计院(湖北)有限责任公司. DB42/T159 - 2012 基坑工程技术规程[S]. 武汉:湖北省建设工程标准定额管理总站,2012.

[3] 陈培雄,潘国富,许建灵,等. 东海陆架海底浅表层土静力触探参数与物理力学指标相关分析[J]. 工程勘察,2009,(6):34 - 37.

[4] 李鹏,许再良,李国和,等. 基于静力触探的不同压力段土体压缩模量确定方法研究[J]. 工程勘察,2013,(11):5 - 9.

[5] 马海鹏,陈祖煜,于沐,等. 上海地区土体抗剪强度与静力触探比贯入阻力相关关系研究[J]. 岩土力学,2014,35(2):536 - 542.

[6] 储团结,黄俊杰,王中华,等. 静力触探试验确定软黏性土抗剪强度研究[J]. 路基工程,2005,6(1):1 - 4.

[7] 徐佳成,王玉杰,陈祖煜,等. 静力触探试验数据库的建立及土体参数相关性分析[J]. 岩土工程技术,2010,24(6):307 - 311.

[8] 杜学玲,杨俊彪,张喜发,等. 沙漠砂抗剪强度指标与原位测试指标关系研究[J]. 岩土力学,2005,26(5):837 - 840.

[9] YU H S. In situ soil testing from mechanics to interpretation[J]. Geomechanics and Geoengineering,2006,1(3):165 - 195.

[10] 吴道祥,单灿灿,钟轩明,等. 静力触探的发展及其在岩土工程中的应用[J]. 合肥工业大学学报:自然科学版,2008,31(2):211 - 215.

[11] 宋玲,李宁,李莺,等. 软岩的旋转触探参数与力学参数的内在关系研究[J]. 岩石力学与工程学报,2011,30(6):1274 - 1282.

[12] 童立元,涂启柱,刘松玉,等. 基于多功能地震波孔压静力触探的唐山地区砂土液化特性再调查试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2013,32(增1):2782 - 2791.

[13] 邹海峰,蔡国军,刘松玉,等. 基于孔压静力触探试验的土类指数共振法加固液化地基效果评价[J]. 岩石力学与工程学报,2013,32(增2):4105 - 4114.

[14] 曹权,施建勇,雷国辉,等. 基于波速孔压静力触探试验研究软土中单桩桩侧承载力时效性[J]. 岩石力学与工程学报,2011,30(7):1482 - 1487.

[15] 蔡国军,刘松玉,童立元,等. 基于静力触探测试的国内外砂土液化判别方法[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(5):1019 - 1027.

[16] 杨光华,骆以道,张玉成,等. 用简单原位试验确定切线模量法的参数及其在砂土地基非线性沉降分析中的验证[J]. 岩土工程学报,2013,35(3):401 - 408.

(编辑:赵凤超)

干扰问题,保证工期质量均处于受状态。

7 灌浆控制成果

(1) 固结灌浆共压水检查 45 个孔 50 段,透水率平均值为 1.69 Lu,远小于设计透水率 5 Lu,压水检查合格率 100%。灌后单孔声波纵波速度平均值提高 3.9%;跨孔声波纵波速度平均值为 4 357 m/s,相比灌浆前提高 3.84%,其中波速大于 3 400 m/s 测点占 99.71%,没有小于 3 000 m/s 的测点,单孔、跨孔声波测试检查结果均满足设计及相关规范要求。

(2) 帷幕灌浆检查孔总数为帷幕灌浆孔总数的 10%,采用钻孔单点压水实验法进行透水率检测,检测涉及 5 个部位,合计 73 段,透水率平均值为 0.92 Lu,远小于设计透水率 3 Lu,压水检查合格率 100%。

8 结 语

陶岔渠首枢纽工程基础施工存在岩溶发育、透水强、深覆盖层等难点。在工期紧张等不利条件下,建设者根据客观实际情况,并结合相关工程实践,不断通过科学手段优化灌浆施工工艺,使得坝基承载力和防渗等各项指标均满足设计和规范要求,有效保证了工程工期,对类似工程灌浆施工具有一定借鉴意义。

参考文献:

[1] DL/T5148-2012 水工建筑物水泥灌浆施工技术规范[S].

[2] 程良奎. 岩土加固实用技术[M]. 北京:地震出版社,2004

[3] 冯忠居. 基础工程[M]. 北京:人民交通出版社,2001.

(编辑:胡旭东)

Discussion on grouting technique of dam foundation rock in Taocha headwork hydro – complex of South to North Water Diversion Project

WANG Mian

(Yancheng Water Resources Investigation and Design Institute, Yancheng 224002, China)

Abstract: Taocha headwork hydro – complex project is the canal head of phase I project of the main diversion canal of Middle Route of South to North Water Diversion Project, where the geological conditions are characterized as broken mass, developed rock gap, and strong water permeability, thus bringing difficulties to the grouting construction. The grouting experiment was carried out for selecting typical section and strata, so the relevant parameters that should be strictly controlled during grouting construction such as pressure, discharge, water – cement ratio were obtained. A series of measures for optimizing the grouting construction technique were put forward by referencing to the engineering experiences of other projects, so it made sure that the dam foundation bearing capacity, anti – seepage and other indicators met the design and specification requirements.

Key words: grouting technique; design optimization; karst development; Taocha headwork hydro – complex project

(上接第 39 页)

Research on shear strength index selection of soft soil according to Ps Value

MA Yun^{1,2}, LI Song¹, XU Guangli², SUN Pan¹

(1. Central Southern Geotechnical Design Institute Co. , Ltd. , Wuhan 430071, China; 2. Engineering Faculty, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: A static cone penetration test and a shear strength test of soft soil at some typical foundation pits in Wuhan Yangtze River level – I terrace are carried out to analyze relevance between Ps value and shear strength index through more than 500 groups of test data, which led to the regression fitting curve equation. The result shows: there exists good correlation between Ps value and shear strength index of soft soil in Wuhan Yangtze River level – I terrace. The shear strength index under different test conditions by Ps value is calculated according to the regression fitting curve equation. Based on finite element method, a 3D numerical analytic model for deep foundation pit is established, through which the simulation values and the measured values of horizontal displacement of the supporting pile are compared and analyzed. It is concluded that three axis consolidation un – drained shear strength index is more in line with the actual measured results. The regression fitting curve equation can provide a simple and easy method for obtaining shear strength index of soft soil in Wuhan Yangtze River level – I terrace.

Key words: soft soil; deep foundation pit; static cone penetration test; shear strength index; Wuhan Yangtze River level – I terrace