珠海地区软土的工程特性及工程建设问题

林奕禧[1]，艾康洪[2]，黄良机[1]

(1. 珠海市建设工程质量监督检测站，广东 珠海　519015；2. 广东省珠海工程勘察院，广东 珠海　519002)

摘要：通过收集整理大量的软土测试资料，获得具有代表性的珠海地区软土的物理力学性质指标，指出该地区软土普遍具有含水量大、压缩性高和承载力低等工程特性，而且还具有很强的结构性和欠固结特性。此外，结合珠海地区软土工程建设的成功经验和失败教训，对珠海软土地基处理、软土基坑工程和软土桩基工程等有关岩土工程问题进行综述。

关键词：土力学；软土；地基处理；基坑支护；桩基础

中图分类号：TU 471.8　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1000－6915(2006)增 2－3372－05

ISSUES OF ENGINEERING CHARACTERISTICS AND ENGINEERING CONSTRUCTION OF SOFT CLAY IN ZHUHAI REGION

LIN Yixi[1]，AI Kanghong[2]，HUANG Liangji[1]

(1. *Zhuhai Municipal Construction Engineering Quality Supervision and Test Station*，*Zhuhai*，*Guangdong* 519015，*China*；
2. *Zhuhai Institute of Engineering Survey*，*Zhuhai*，*Guangdong* 519002，*China*)

Abstract：Physico-mechanical properties of soft clay in Zhuhai Region have been achieved according to the data collected from the in-situ tests. Results show that the characteristics of soft soil in Zhuhai Region are with higher water content，higher compressive property，and lower load capacity. The soils have the strongly structural characteristics and preconsolidation characteristics too. Based on a detailed investigation into the previous engineering construction in Zhuhai Region and the experience with both successful and failure results，an overview is withdrawn on the soft soil treatment，soft soil foundation pit，pile foundation and other geotechnical engineering issues.

Key words：soil mechanics；soft soil；foundation treatment；pit supporting；pile foundation

1　引　言

珠海地处广东省中部沿海、珠江三角洲的南部前缘，构造上属新华夏系第二隆起带中次级紫金－博罗断裂带和莲花山断裂带的西南段，并被 NW 向的西江断裂分割成梯形断块，而 SE 和 WN 两侧分别与珠江口大型新生代沉积盆地和陆地上珠江三角洲盆地相邻。珠海地区层状地貌特征明显，除山地、丘陵及台地外，地貌单元以冲积海积平原和海积平原为主。冲积海积平原主要分布在前山水道、磨刀门水道、鸡啼门水道及虎跳门水道等大河道的两侧，一般相对高程 0～2 m，沉积物以淤泥和淤泥质砂为主；海积平原主要分布在海洋泥沙在海湾逐渐淤积而成的平原或人工围垦而成的平原区，沉积物以淤泥层为主。因此珠海地区软土分布广泛，占陆地总面积的 50%～60%。由于其形成机制的特殊性，软土具有含水量大、压缩性高及承载力低且具结构性等特性，给工程建设带来很多困难。本文收集珠海地区软土工程勘察、设计、施工和现场监测资料，

收稿日期：2006－05－18；**修回日期：**2006－07－21

作者简介：林奕禧(1956－)，男，1982 年毕业于华南理工大学建筑结构专业，现任高级工程师、珠海市建设工程质量监督检测站副站长、总工程师，主要从事工程设计、施工和质量管理方面的工作。E-mail：h13809230572@yahoo.com.cn

对珠海地区软土的工程特性和工程建设问题进行综述。

2　软土分布规律及物理力学性质

2.1　软土分布规律

珠海地区软土主要由冲积海积相(Q_4^{al+m})和海积相(Q_4^m)沉积的淤泥及淤泥质土组成，主要分布于磨刀门、泥湾门、鸡啼门及虎跳门几条主要水道两侧的平原区及沿海区。根据工程建设所揭示的地层情况，珠海地区软土分布大致可划分为 5 个区：(1) 金湾区，包括三灶镇、红旗镇、平沙镇及高栏港区等，软土分布面积广，层位稳定，厚度 20～40 m，淤泥为主；(2) 珠海保税区一带，分布面积较大，层位稳定，厚度 15～30 m，靠近磨刀门水道侧局部超过 40 m，淤泥为主；(3) 南屏科技园一带，软土广泛分布，层位稳定，厚度一般为 10～20 m，近前山河侧软土层较薄，近磨刀门侧软土层较厚，最大厚度超过 30 m，淤泥层为主；(4) 横琴岛一带，软土分布面积较广，层位稳定，厚度一般为 20～50 m，以淤泥层为主；(5) 香洲区近海岸一带，软土零星分布，分布面积小，层位不稳定，厚度一般为 6～15 m，埋藏于硬壳层下，以淤泥及淤泥质土为主。

2.2　软土物理力学性质指标

珠海市建设工程质量监督检测站曾收集珠海地区 1 078 件淤泥样的土工试验资料，统计成果详见表 1，2。

2.3　软土主要岩土工程特性

软土本身的成因及其物理力学性质决定软土具有如下的岩土工程特性：

(1) 承载力低：珠海地区软土天然含水量平均值 $w = 64.18\%$，塑性指数平均值 21.7，液性指数平均值 1.58，孔隙比平均值 $e = 1.80$，十字板剪切强度平均值 $C_u = 23.09$ kPa，标贯试验锤击数 N＜1 击，未经修正的软土地基承载力特征值一般为 30～60 kPa。

(2) 压缩性高：室内试验测试软土平均孔隙比 $e = 1.80$，平均压缩系数 $a_{1-2} = 1.60\ \mathrm{MPa}^{-1}$，属高压缩性土，因此珠海地区软土具有高压缩性。

(3) 具结构性：测试软土平均灵敏度 $S_t = 4.56$，属高灵敏性土，具有很强的结构性，一旦受到扰动，其强度将迅速降低。

(4) 欠固结特性：统计室内测试淤泥层先期固结压力平均为 $p_c = 85.15$ kPa，而软土平均厚度超过 10～20 m，上覆填土厚度 3～5 m，软土层的自重压力一般超过 200 kPa，因此，绝大多数软土层表现为欠固结特性。

3　软基处理

软基处理的目的主要是提高地基承载力和减少地基沉降量[1]。珠海地区常用的软基处理方法有水泥土搅拌法和预压法。

水泥土搅拌法曾一度在珠海地区大量使用，但也出现不少问题。自 1999 年 7 月 15 日珠海市建设局颁发《珠海市建筑地基处理水泥搅拌桩工程若干技术规定》(珠府建[1999]288 号)[2]以来，珠海工程界已形成如下共识：水泥土搅拌法可用于处理桥台、道路路基、水闸闸基、地坪、堆场、岸边和管沟等对不均匀沉降不敏感的工程项目和基坑支护临时工程的软基处理，而谨慎用于房屋建筑的软基处理。总结多年来的工程实践经验，采用水泥搅拌法处理软弱地基时应注意如下几点：

(1) 水泥土搅拌法仅适用于对不均匀沉降不敏感的工程和基坑支护等临时工程。

(2) 软土底面埋深不宜大于 15 m，竖向承重搅拌桩的桩端应进入相对硬层。

(3) 所处理的软土塑性指数不宜大于 22。

(4) 据室内水泥土试块强度 f_{cu} 确定单桩承载力特征值 R_a 时，强度折减系数 η 宜取 0.20～0.25。

(5) 水泥掺入比常用 15%～20%，复合地基承载力特征值一般为 70～120 kPa。

(6) 宜采用“四搅四喷”工艺，搅拌叶片宽度宜大于 100 mm，叶片与水平面夹角宜大于 30°。

预压法的排水措施过去以袋装砂井为主，近几年主要采用塑料排水板。预压荷载一般采用堆载预压、真空预压、堆载与真空联合预压 3 种加载方法。珠海海泉湾建设场地淤泥及淤泥质土层厚 15～20 m，设计采用塑料排水板及堆载联合真空预压法进行处理，先吹填厚约 3 m 的砂层，在砂垫层上打设塑料排水板，排水板穿过淤泥层进入黏土层 0.5 m，然后铺膜抽真空，要求膜下真空度不小于 80 kPa，真空预压 40 d 后再吹砂堆载 2.0～3.0 m，持续真空预压至淤泥层固结度达 90%，经过近 6 个月的排水固结，软土固结度达 90%时监测场地软土固结沉降量普遍为 1.5～2.0 m，最大

表 1　珠海地区软土物理力学性质指标统计个数

Table 1　Numbers of physico-mechanical properties of soft soils in Zhuhai Region　　个

项目	垂直固结系数					水平固结系数					先期固结压力	压缩指数	无侧限抗压强度	十字板剪切试验			标贯锤击数
	P = 50 kPa	P = 100 kPa	P = 200 kPa	P = 300 kPa	P = 400 kPa	P = 50 kPa	P = 100 kPa	P = 200 kPa	P = 300 kPa	P = 400 kPa				原状土抗剪强度	重塑土抗剪强度	灵敏度	
统计个数	98	328	121	59	26	85	284	99	51	17	25	22	84	252	252	258	112

项目	天然含水量	天然重度	孔隙比	液限	塑限	塑性指数	液性指数	有机质含量	压缩系数	压缩模量
统计个数	1 078	1 078	1 078	1 063	1 063	1 063	1 060	558	789	786

项目	直剪试验						三轴剪切试验					
	快剪		固结快剪		慢剪		UU		CU		CD	
	φ	c	φ	c	φ	c	φ	c	φ	c	φ	c
统计个数	461	461	266	266	9	9	11	11	12	12	6	6

注：P 为围压，下同。

表 2　珠海地区软土物理力学性质指标

Table 2　Physico-mechanical properties of soft soils in Zhuhai Region

取值类型	天然含水量 w/%	天然重度 γ /(kN・m^{-3})	孔隙比 e	液限 w_L/%	塑限 w_p/%	塑性指数 I_p	液性指数 I_L	有机质含量 /%	压缩系数 a_{1-2}/MPa^{-1}	压缩模量 E_s/MPa
最小值	41.6	11.6	1.47	33.3	18.4	9.2	0.97	0.62	0.34	0.67
最大值	132.0	17.2	4.19	119.0	78.0	44.0	5.14	9.11	4.68	4.11
算术平均值	64.2	15.6	1.80	51.6	29.3	21.7	1.58	2.73	1.60	1.79

取值类型	垂直固结系数 C_V/(10^{-3} cm^2・s^{-1})					水平固结系数 C_H/(10^{-3} cm^2・s^{-1})					先期固结压力 p_c /kPa	压缩指数 C_c	无侧限抗压强度 q_u /kPa	十字板剪切试验			标贯锤击数 /击
	P = 50 kPa	P = 100 kPa	P = 200 kPa	P = 300 kPa	P = 400 kPa	P = 50 kPa	P = 100 kPa	P = 200 kPa	P = 300 kPa	P = 400 kPa				原状土抗剪强度 C_u/kPa	重塑土抗剪强 C_u/kPa	灵敏度 S_t	
最小值	0.35	0.35	0.30	0.336	0.24	0.25	0.28	0.34	0.26	0.30	42.0	0.420 0	0.09	5.36	0.96	1.13	0.0
最大值	2.96	1.23	2.88	1.060	2.21	9.70	7.84	8.60	1.10	0.93	162.0	0.924 3	30.40	61.80	28.70	12.00	2.0
算术平均值											85.15	0.620 0	11.23	23.09	8.99	4.56	0.6

取值类型	直剪试验						三轴剪切试验					
	快剪		固结快剪		慢剪		UU		CU		CD	
	φ /(°)	c /kPa	φ/ /(°)	c /kPa	φ /(°)	c /kPa	φ /(°)	c /kPa	φ /(°)	c /kPa	φ /(°)	c /kPa
最小值	0.0	0.8	0.0	0.0	14.7	22.0	1.0	4.0	9.0	3.0	14.8	15.0
最大值	18.9	26.0	22.0	26.6	18.9	41.0	6.6	8.0	15.1	25.0	19.5	25.0
算术平均值	1.97	5.8	5.1	9.6	16.8	29.0	2.8	5.4	12.6	11.2	17.3	17.8

沉降量达 2.4 m。珠海横琴中海油天然气终端场地软土地基厚 33～35 m，采用同样的方式处理，塑料排水板打设深度 25 m，吹砂堆载高度 4 m，真空预压荷载 80 kPa，软土固结度达 90%时监测软土最大固结沉降量达 2.0 m。平沙温泉路采用塑料排水板及堆载预压进行处理，软土厚度 16～20 m，堆载高度 4 m，珠海质检站对其监测的结果显示：固结度为 90%时的固结沉降量为 1.4～2.0 m，20 m 以下软土

固结沉降量很小。总结多个工程实例，在珠海及类似地区采用预压法处理软弱地基时如下两点经验可供参考：

(1) 采用分层总和法计算地基变形时，沉降计算经验系数可取ξ=1.8～2.5。

(2) 预压法加固影响深度约 20 m。

4　基坑支护问题

珠海软土分布区的基坑支护工程是一项高风险的工程[3]，各种结构型式的支护工程在珠海都有成功实例，但也出现不少工程事故，归纳起来有如下几类：

(1) 软土层厚度大，支护结构下端无法进入相对硬层，被动土压力区的土体所受压应力过大、远超过土的侧向承载力，引起支护结构中下部变形过大、软土层滑移、坑底隆起，导致支护结构破坏。横琴联检楼工程中的化粪池支护工程，在软土中打 12 m 长的钢板桩并设内支撑仍无法挖下 3 m 深的化粪池，就是这类土质支护结构不成功的典型实例。

(2) 由于对场地软土层勘察不详细，设计计算时取值不准确，因此导致支护方案设计过于冒险，最终酿成基坑支护工程事故。尽管现在超过 5 m 深度的基坑支护方案必须由珠海市建设局组织专家评审，基坑支护方面一些灾害性的事故也相应减少，但一些明显不合理的设计方案仍时有出现。

(3) 当支护结构未穿越软土层时，主动土影响区远大于常规概念中的 2～4 倍基坑开挖深度，土体位移也较大，容易损害周边管网。当损坏有压水管时，极易引起支护结构破坏。

(4) 采用水泥土挡墙作支护结构时，由于淤泥层成桩质量难以控制，水泥土强度低，支护结构强度不足导致墙体受弯而发生剪切破坏。

总结常见的基坑工程事故并结合珠海工程建设现状，在软土分布区进行基坑支护勘察、设计与施工时，如下几点经验可供借鉴：

(1) 放坡卸荷的方法是支护结构设计中最简单的方法，当条件允许时仍然是最有效、最经济的办法，应优先予以考虑。

(2) 应充分利用支护结构的整体性。图 1 为珠海保税区内一基坑工程[4]，地下室长 173.18 m，宽 28.80 m，基坑面积约 5 000 m^2，基坑开挖深度为 4.80 m，支护结构采用水泥土搅拌桩重力式挡土墙，

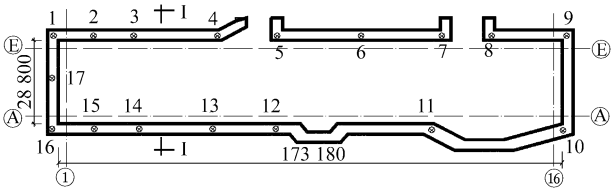

图 1　基坑平面示意图(单位：mm)

Fig.1　Schematic diagram of pit excavation(unit：mm)

四周均由 8 排直径ϕ600 mm 的搅拌桩组成。基坑长向在施工阶段采取很多减载、平衡措施后，长向近中间部位测点的顶部侧移为 301 mm，约为短向近中间部位测点侧移 9 mm 的 33 倍。该支护工程最后只好采取人工开挖。如果在基坑的长向中间再设几道横向搅拌桩隔墙，将该基坑分隔成若干小基坑，该支护结构外围就不一定要做 8 排搅拌桩且位移可明显减少。特别是支护结构未能穿越软土层时，采用大格栅将大基坑分隔成几个小基坑对变形控制效果是十分显著的。

(3) 设计时，应适当控制基坑内侧被动土压力区的压应力水平。如需要调动较高的被动土压力时，可采取预压、置换或构筑复合地基等方法加固被动土压力区土体甚至采取结构措施等方法进行处理。

(4) 如果软土塑性指数较大，且需采用水泥土搅拌桩支护结构时，应适当增加搅喷次数，增加水泥用量。同时可在水泥土桩中插入钢筋或型钢，以提高支护结构整体强度和刚度。

(5) 软土区进行基坑支护与土方开挖施工时，必须按规范要求进行监测。尤其应采用精密仪器准确测量基坑内土体隆起、基坑外侧土体沉降以及基坑外侧土体和基坑支护结构侧向位移，根据监测结果指导基坑开挖施工，是预防出现基坑坍塌等突发性事故的有效途径。

5　桩基础施工问题

软土地区进行桩基础施工常见问题是打桩过程陷机挤断基桩和基坑土方开挖引起基桩倾斜甚至断裂[5]。除非表层填土厚度和强度足够，否则在软土分布区的预应力管桩施工不应采用静压桩。由于基坑土方开挖方法不当，土体过大的侧向压力引起基桩倾斜甚至断裂的现象在软土地区时有发生[6]，这一问题在土方开挖前往往得不到有关单位和工程技

术人员的重视，等到事故发生后才“望淤泥而兴叹”。例如珠海香洲科技园一厂房采用预应力管桩基础，基坑开挖深度约 1.7 m，刚好挖除填土层并露出淤泥面，开挖时挖出的土方堆放在离坑边 2～3 m 处，堆高约 1.5 m，开挖后即发现坑底淤泥涌起，工程桩倾斜破坏。珠海香洲科技园内的另一厂房，地面下填土厚度 1.2 m，其下为淤泥，用挖掘机开挖 1.5 m 深的桩承台基槽，刚挖破填土层时就出现坑底涌泥，基桩倾斜折断，淤泥的威力足见一斑。因此，软土地基的基坑基槽开挖应采用小型机械，必要时应采用人工开挖；软土地基应分层开挖，并应严格控制分层厚度，一般每层厚度不宜超过 0.8 m。

6　结　语

(1) 珠海地区软土分布广泛，通过收集整理大量的软土测试资料获得该地区具有代表性的物理力学性质指标。该地区软土普遍具有含水量大、压缩性高、承载力低等特性，此外还具有很强的结构性和欠固结特性。

(2) 采用水泥土搅拌法处理软土地基时应注意其适用范围，一般可用于处理对不均匀沉降不敏感的工程项目和基坑支护临时工程的软基处理，而不宜用于房屋建筑的软基处理。处理深度一般不宜大于 15 m。

(3) 采用塑料排水板以及堆载联合真空预压是珠海地区比较常用且有效的软基处理方法之一。多项工程实例证明采用预压法处理软弱地基时其加固影响深度一般在 20 m 以内且固结沉降量大。采用分层总和法计算预压地基变形时沉降计算经验系数宜取 ξ =1.8～2.5。

(4) 建议在软土分布区进行基坑支护设计与施工时应注意以下几点：① 应优先考虑放坡卸荷的方法；② 应充分利用支护结构的整体稳定性；③ 可采取预压、置换或构筑复合地基等方法加固被动土压力区土体，适当提高被动土压力值；④ 可在水泥土桩中插入钢筋或型钢以提高支护结构整体强度和刚度；⑤ 应采取信息法施工，监测土体沉降及隆起和侧向位移等变形。

(5) 软土分布区桩基础施工时应重点预防因桩机陷机或者是基坑土方开挖不当导致基桩倾斜或断裂，建议在淤泥层中采用小型机械或人工分层开挖，并严格控制分层厚度，一般不宜超过 0.8 m。

参考文献(References)：

[1] 崔红军，吕小林，王孝明. 湖积软土地基的处理方法[J]. 岩石力学与工程学报，2004，23(17)：2 998－3 002.(Cui Hongjun，Lu Xiaolin，Wang Xiaoming. Reinforcement method of lacustrine soft foundation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2004，23(17)：2 998－3 002.(in Chinese))

[2] 珠海市建设局. 珠海市建筑地基处理水泥搅拌桩工程若干技术规定(珠府建[1999]288 号)[S]. 珠海：[s. n.]，1999.(Zhuhai Construction Bureau. Technical Code for Mixing Cement Piles on Foundation Treatment of Zhuhai[S]. Zhuhai：[s. n.]，1999.(in Chinese))

[3] 龚晓南. 深基坑工程设计施工手册[M]. 北京：中国建筑工业出版社，1998.(Gong Xiaonan. Design and Construction Manual for Deep Foundation Engineering[M]. Beijing：China Architecture and Building Press，1998.(in Chinese))

[4] 黄良机. 某重力式挡墙基坑支护工程事故实例分析[J]. 岩土工程界，2003，6(12)：44－46.(Huang Liangji. Analysis of an accident example of the gravity wall for foundation pit support[J]. Geotechnical Engineering World，2003，6(12)：44－46.(in Chinese))

[5] 《桩基工程手册》编写委员会. 桩基工程手册[M]. 北京：中国建筑工业出版社，1995.(The Compilation Group of Manual for Pile Foundation Engineering. Manual for Pile Foundation Engineering[M]. Beijing：China Architecture and Building Press，1995.(in Chinese))

[6] 黄良机，李利荣，张曙辉. 珠海地区预应力混凝土管桩工程主要质量问题及质量控制对策[J]. 工程质量，2004，(4)：41－44.(Huang Liangji，Li Lirong，Zhang Shuhui. Major quality problems and countermeasures of prestressed concrete pipe pile construction in Zhuhai[J]. Quality of Civil Engineering and Construction，2004，(4)：41－44.(in Chinese))