



# 横琴滨海超软土地区地下工程建设基础选型

钱国锋<sup>1</sup>, 席文熙<sup>1</sup>, 刘健<sup>1</sup>, 钱立明<sup>1</sup>, 文登国<sup>2</sup>

(1. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007;

2. 中国市政工程西南设计研究总院有限公司, 四川 成都 610081)

**摘要:** 对横琴滨海超软土地区地下工程建设(包括地下综合管廊、大型商业地下空间)地质条件、承载力、沉降控制、基础比选论证等进行分析, 提出横琴地区地下工程基础推荐方案, 并给出不同覆土深度下的合理间距, 形成基础设计的标准化文件并将其成功地应用于工程实践中, 达到“结构安全可靠、经济合理可控、工程实施可行”的总体要求。

**关键词:** 地下工程; 地基处理; 沉降; 承载力; 基础选型

中图分类号: TU 471.8; U 65

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)11-0174-05

## Foundation selection for underground engineering construction in Hengqin marina soft soil region

QIAN Guo-feng<sup>1</sup>, XI Wen-xi<sup>1</sup>, LIU Jian<sup>1</sup>, QIAN Li-ming<sup>1</sup>, WEN Deng-guo<sup>2</sup>

(1. CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China;

2. China Southwest Municipal Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Chengdu 610081, China)

**Abstract:** This article analyzes the geologic condition, bearing capacity, settlement control, and foundation type, etc. of underground engineering (including underground pipe gallery and large commercial underground space) in soft soil area of Hengqin waterfront and recommends the foundation type of underground engineering and reasonable spacing of different soil depths in Hengqin area, based on which, the standardized document for the foundation design is formed and successfully applied to the engineering practice. By the scheme, we meet the general requirements of “safe and reliable structure, reasonable and controllable economy, and feasible engineering implementation”.

**Keywords:** underground construction; ground improvement; sedimentation; bearing capacity; foundation selection

横琴位于珠海市南部、珠江口西侧, 毗邻港澳, 南濒南海。岛内平原、海湾地段和海岛周边广泛分布近代海退所形成的浅海淤积及山洪河道冲积形成的淤泥质土, 厚度大。目前横琴本岛在原有池塘、田埂等自然地貌上进行大面积吹填后, 正在进行海堤工程、地下工程(包括地下综合管廊、大型地下商业)及市政道路桥梁工程的建设。本文针对横琴滨海超软土的地质条件, 以大规模同步建设的地下车行通道为例, 对地基处理以及基础选型进行论证分析,

给出横琴地区建设大型地下工程推荐的地基处理与基础方案, 为后续滨海地区地下工程建设提供参考。

### 1 地质条件

根据勘察资料分析, 横琴地区淤泥质软土主要有以下几点特性: 1) 厚度大, 一般为 20~40 m; 2) 含水率极高: 上部淤泥平均值为 74.5%, 局部高达 80%以上; 3) 压缩性强: 压缩系数平均值为  $2.59 \text{ MPa}^{-1}$ , 属高压缩性土; 4) 强度低: 十字板

收稿日期: 2016-04-06

作者简介: 钱国锋(1982—), 硕士, 工程师, 从事岩土与地下工程设计工作。

强度 5~15 kPa; 5) 结构性差: 属高灵敏性土, 结构一旦受到扰动, 强度便迅速降低并呈流塑状。由此可知, 该区软土易产生沉降、不均匀沉降和震陷, 工程性质极差。

## 2 地基处理方案

在横琴本岛大面积吹填形成陆域后(高程

3.70 m), 在地下工程建设前, 如果不进行地基预处理, 将会给基坑开挖和基础不均匀沉降带来极大的安全隐患。场区基坑开挖深度为 8~10 m, 为保证基坑开挖、支护和降水过程中基坑侧壁和基底稳定不发生淤泥反涌, 必须进行地基处理。下面就国内常用的软土地区地基处理方法的优缺点做对比分析(表 1)。

表 1 国内常用的软土地区地基处理对比

处理方法	优点	缺点
真空预压	处理时间短、处理深度大、无弃土、工艺成熟、造价低	对周边存在变形影响
堆载预压	处理深度大、无弃土、施工方便	对周边存在变形影响、工期长
强夯置换	施工器械简单造价低、工期短	处理深度受限、处理效果差
振冲	造价低、施工器械简单、工期短	处理效果差、后期沉降大
挤密砂桩	后期沉降相对较小、加固深度大	造价高、一般用于海上
水泥拌合法	后期沉降小、刚度高、防渗性能好	加固深度受限、造价高、质量控制难

工程实践证明, 在周边环境 and 现场条件具备的情况下, 吹填完成后进行排水固结是行之有效的地基处理方法, 能够满足上部结构的设计要求。对拟建区域进行真空预压或真空联合堆载预压处理, 能够使土体物理力学指标有较大的改善。对于工期要求紧的工程, 可采用直排式真空预压, 工期可缩短至 4~6 个月。地基处理前后土体主要指标变化情况如表 2 所示。

表 2 真空联合堆载预压地基处理前后物理力学指标(表层 5~7 m)

阶段	含水率 $\omega/\%$	直剪快剪		固结快剪	
		C/kPa	$\varphi/(\circ)$	C/kPa	$\varphi/(\circ)$
处理前	73.4	3.5	1.2	6.0	10.3
处理后	59.2	6.6	4.5	10.1	14.2

## 3 地下工程基础沉降标准的确定

目前, 横琴本岛在吹填和地基处理后, 正在进行市政道路工程等基础设施建设, 垂直穿越市政道路的地下车行通道与之同步建设, 拟建的地下车行通道交叉部位与将来进行二级土地开发的高层地下室-2F(规划高程一般为-5.20 m)衔接。本文以垂直穿越市政道路的地下车行通道为例(一般长度 30~40 m), 其沉降控制指标确定如下:

1) 参考深圳前海深港合作区的建设项目, 地下车行通道系统经论证后的沉降和不均匀沉降控

制标准定为: 沉降小于 50 mm, 差异沉降小于 2‰。

2) 考虑垂直穿越的上部市政道路工程的沉降标准。市政道路工程的沉降控制标准为: 主干道 30 cm, 次干道 50 cm。地下车行通道与两侧路基的差异沉降采用增加过渡段搅拌桩来解决。

3) 考虑与地下车行通道平行衔接的高层建筑(采用灌注桩或管桩基础)地下室无沉降。

4) 地下工程的防水措施是影响地下结构耐久性以及运营使用的关键因素, 因此在确定沉降控制指标时须考虑地下工程与其他结构衔接部位的止水措施。经调研, 止水带可允许的竖向差异沉降为 20 mm。

综合以上分析, 本次计算拟定竖向差异沉降为 20 mm, 均能满足上述要求。

## 4 基础方案比选实例

结合横琴地区经验, 对该区域较为成熟的有代表性的基础方案进行比选: 方案 1 为预应力管桩基础, 方案 2 为搅拌桩基础。

### 4.1 计算点地质条件和设计标准

计算选取某代表性钻孔, 淤泥层厚度 22.7 m, 淤泥底高程-22.75 m。淤泥质黏土厚度为 5.8 m, 底高程-34.85 m。地下车行通道标准断面见图 1, 计算点钻孔柱状图见图 2。

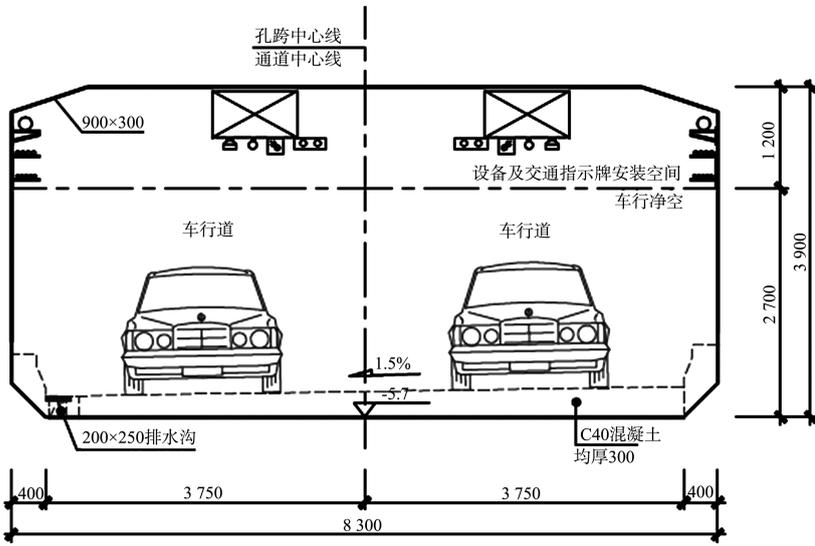


图1 地下工程标准断面 (高程: m; 尺寸: mm)

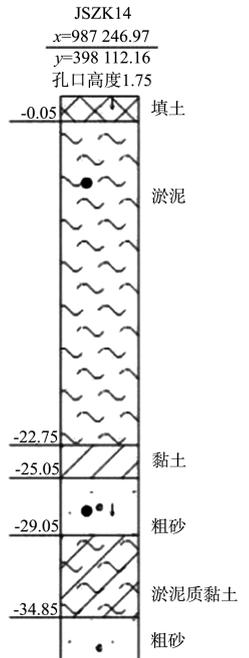


图2 钻孔柱状图 (高程: m)

1) 设计合理使用年限: 100 a。结构构件的重要性系数采用  $\gamma_0 = 1.1$ 。

2) 结构安全等级为一级, 地基基础设计等级为乙级, 地下车行通道环境类别为三 b 类(海岸环境)。防水等级为一级, 耐火等级为一级。

3) 裂缝最大宽度限制值: 外侧不超过 0.20 mm, 内侧不超过 0.30 mm。

4) 规划地下车行通道的底板高程一般为 -5.20 m, 顶板上部覆土 5~8 m, 因此基坑开挖深度约 10.0 m。

#### 4.2 方案 1: 预应力管桩基础

1) 管桩桩身强度计算。

根据标准设计图集, 预应力混凝土管桩采用 PHC 800 AB 110。

桩身轴心受压承载力设计值为 5 992 kN, 考虑受压稳定系数 0.85, 特征值系数取 1.35, 安全系数 1.15。设计采用单桩承载力<sup>[1]</sup>约为 3 200 kN。

2) 管桩经济合理间距的确定。

根据桩顶不同的覆土深度, 为给出在不同覆土深度下经济合理的桩间距, 进行建模分析, 如图 3 所示。分析表明, 桩顶力与桩间距成正比。通过类比得知, 在覆土深度为 7.18、6 m 时, 不同桩间距与桩顶反力对应关系见表 3。

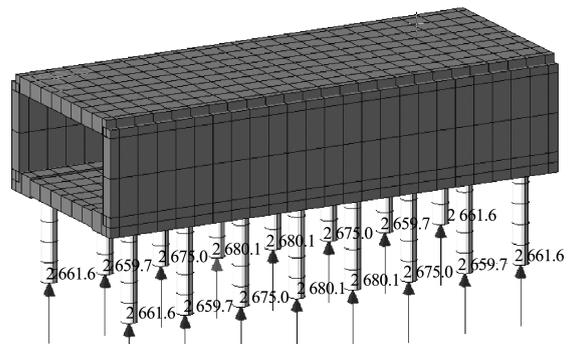


图3 空间三维梁板模型标准组合下 桩顶力设计值 (单位: kN)

表3 覆土深度不同时桩间距与桩顶反力对应关系

覆土深度/m	桩间距/m	桩顶力/kN
7.18	2.5	2 250
	3.0	2 700
	3.5	3 150
	4.0	3 600
	4.5	4 050
6.00	2.5	1 850
	3.0	2 300
	3.5	2 750
	4.0	3 200
	4.5	3 650

分析表 3 可知, 本项目采用 D800 mm 管桩基础时, 设计桩顶力取 3 200 kN, 当覆土为 7.18 m 时桩间距取为 3.5 m 是经济合理的; 在覆土深度

为 6 m 时, 桩间距取为 4.0 m 是经济合理的。

因此, 本次设计关于桩间距较为合理的标准为: 覆土厚度  $\leq 6$  m 采用 4.0 m 桩间距, 覆土厚度  $> 6$  m 采用 3.5 m 桩间距。

### 3) 管桩承载力计算。

根据桩顶力 3 200 kN, 对钻孔地层进行桩长计算和单桩承载力验算。结果表明, 单桩承载力特征值为 3 844.6 kN ( $> 3$  200 kN), 单桩承载力满足设计要求, 桩长为 37.25 m。

### 4) 沉降分析。

根据工程经验, 对于持力层为强风化的管桩基础, 可以认为地下车行通道无沉降。地下车行通道与市政道路工程的差异沉降采用设置搅拌桩过渡段解决<sup>[2]</sup>; 因高层建筑亦为桩基础, 则地下车行通道与高层建筑相接部位的差异沉降亦忽略不计。

## 4.3 方案 2: 搅拌桩基础

### 1) 复合地基承载力计算。

根据规范公式法计算<sup>[3]</sup>, 在计算单桩承载力后得出复合地基承载力要求为 131.4 kPa。搅拌桩桩径  $d = 0.8$  m, 桩截面积  $A_p = 0.503$  m<sup>2</sup>, 桩周长  $u_p = 2.513$  m, 正方形布置, 间距 1.5 m  $\times$  1.5 m, 分别计算不同桩长复合地基承载力特征值及线性关系(图 4)。

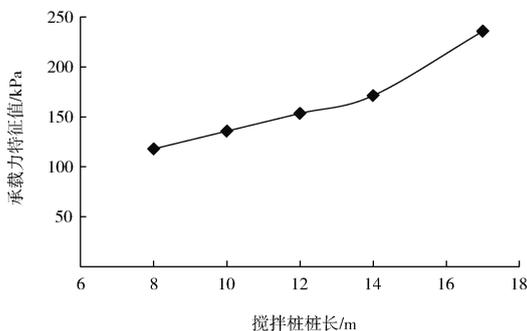


图 4 不同桩长下计算复合地基承载力特征值及线性关系

由图 4 可知, 随着桩长的增加, 复合地基承载力特征值随之增加。若搅拌桩未穿透淤泥层, 则承载力特征值随桩长的增加而呈线性增长; 桩长 17 m 时穿透淤泥层进入黏土层, 由于黏土层能够提供较大的端阻力, 所以复合地基的承载力明显提高。如果以承载力控制, 设计桩长采用 10 m

(未穿透淤泥层), 即可满足复合地基承载力 131.4 kPa 的要求。

### 2) 复合地基沉降计算。

按有限元进行沉降计算, 为更好地分析搅拌桩未穿透淤泥层工况条件下的变形特性, 采用岩土有限元软件 Plaxis 进行模拟, 土体模型采用 Mohr-Coulomb 模型, 搅拌桩处理区域将其等效为加固后的复合土体, 地下通道结构采用板单元进行模拟<sup>[4]</sup>。计算参数见表 4。

表 4 各土层计算参数

土体名称	密度/ (t/m <sup>3</sup> )	粘聚力/ kPa	摩擦角/ (°)	变形模量/ MPa
淤泥	1.56	4.5	3	1.8
黏土	1.90	20.0	8	5.0
粗砂	2.00	0.0	28	25.0
淤泥质黏土	1.71	10.0	5	2.5
搅拌桩加固区	2.20	50.0	20	40.0

板单元计算参数如下:  $EA_{eq} = 8.1 \times 10^6$  kN/m,  $EI_{eq} = 1.5 \times 10^6$  kN  $\cdot$  m<sup>2</sup>/m, 抵抗矩  $w = 26$  m<sup>3</sup>, 计算有限元网格的变形情况如图 5 所示。

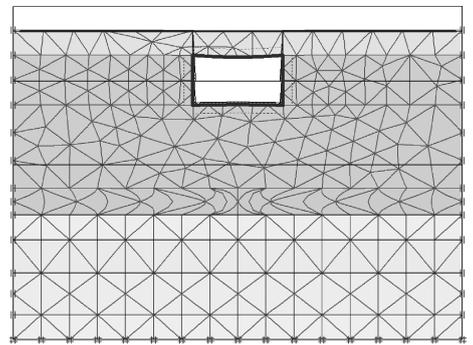


图 5 有限元网格变形图

经有限元计算, 分别给出不同桩长下的总沉降量<sup>[5]</sup>, 限于篇幅原因规范公式法<sup>[6]</sup>计算略, 本文只给出规范法计算结果(表 5)。

表 5 有限元计算沉降与规范公式计算沉降量

搅拌桩桩长/m	有限元总沉降/cm	规范公式总沉降/cm
8	80.4	71.7
10	63.2	57.6
12	56.1	44.5
14	37.8	32.1
17	9.1	19.4

从图4和表5分析可知,桩长10 m时复合地基承载力即可满足要求,但沉降较大。考虑工程经济性以及规范要求,搅拌桩以桩长15~17 m为宜,即使在17 m桩长的情况下仍有9.1 cm的沉降,与高层建筑(采用桩基础无沉降)之间的差异沉降无法满足2.0 cm的控制要求。因此,不推荐采用水泥搅拌桩基础方案。

### 5 结语

1) 在横琴滨海超软土地区特殊的地质条件下,淤泥性状极差,深基坑开挖范围内成流塑-软塑状,保证在基坑开挖、支护和降水过程中,基坑侧壁和基底稳定且不发生淤泥反涌,地基须经排水固结法(真空预压或堆载预压)进行预处理后再进行基坑开挖和基础施工,保证施工和运营期间的安全。

2) 在满足地下工程基本使用功能的情况下,设计必须考虑工后沉降控制要求和后期防水衔接

等结构或构造措施,保证后续其他建筑物能够与其顺利衔接,因此,从技术、经济、施工等角度综合分析,在进行地基处理后,推荐采用预应力管桩基础方案,防止不均匀沉降造成的结构破坏。

### 参考文献:

[1] GB 50007—2011 建筑地基基础设计规范[S].  
 [2] 文登国,全旭,何大学,等.横琴新区市政基础设施项目非示范段主次干路工程一批次道路与地下公共车行通道交叉工程初步设计[R].成都:中国市政工程西南设计研究总院有限公司,2014.  
 [3] DBJ 15-38—2005 广东省地基处理技术规范[S].  
 [4] 陈仲颐,周景星,王洪瑾.土力学[M].北京:清华大学出版社,1994: 20-45.  
 [5] 高大钊,袁聚云.土质学与土力学[M].3版.北京:人民交通出版社,2001: 46-60.  
 [6] 李建华,张璐璐,陈锦剑.土力学与地基基础[M].北京:中国建筑工业出版社,2010: 55-62.

(本文编辑 郭雪珍)

(上接第161页)

### 3 结论

1) 中小型船闸人字闸门可采用非预应力背拉杆,通过加强背拉杆截面并扩大张弦跨度进行改进;预应力背拉杆对增强人字闸门抗扭刚度、降低门头下垂量作用巨大,大中型船闸人字闸门宜采用预应力背拉杆。

2) 静止、开门和关门时人字闸门垂直于面板方向的位移均较大,竖直方向位移次之,压力轴线方向位移最小,说明门体较理想的变形控制参数为垂直于面板方向的位移。

3) 垂直于面板方向的位移最大值出现在关门工况,此时门体变位最大,其次为开门工况,静止工况下最小。因为门体在自重作用下斜接柱底部向上游扭转变形,关门时的壅水荷载和风荷载加剧了向上游侧的扭转。

4) 门轴柱和斜接柱的顶部、中部和底部位移基本呈线性关系,说明人字闸门变形时可将门轴

柱和斜接柱近似看做刚体。

### 参考文献:

[1] 范崇仁.水工钢结构设计[M].北京:中国水利电力出版社,2000.  
 [2] 刘孟穆.船闸人字闸门设计[M].北京:中国水利水电出版社,2007.  
 [3] Department of the Army U S Army Corps of Engineers. Engineering and Design of Lock Gates and Operating Equipment EM 1110-2-2703 [R]. Washington DC : Department of the Army U.S.Army Corps of Engineers, 1984.  
 [4] 邢述炳.浮箱结构船闸人字闸门预应力背拉杆设计[J].水运工程,2013(8): 147-151.  
 [5] 陈志华.张弦结构体系[M].北京:科学出版社,2013.  
 [6] 邢述炳.人字闸门浮箱与预应力背拉杆组合应用研究[D].南京:河海大学,2015.

(本文编辑 武亚庆)