

滨海软土筑岛围堰超深基坑工程实例分析

刘 涛¹, 陈允斌¹, 刘 浩²

(1. 中国海洋大学环境科学与工程学院, 山东 青岛 266100; 2. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430063)

摘要: 以横琴岛澳门大学新校区跨海隧道工程为研究背景, 重点分析研究了滨海地区超深软土地质条件下的海上筑岛围堰超深基坑工程。介绍了该基坑工程的设计方案选型、施工工法工艺, 并基于实测数据, 对该工程基坑开挖全过程的围护结构变形规律进行了分析研究。其研究结果能够为今后滨海地区海上筑岛围堰超深基坑工程的设计、施工提供有价值的参考依据。

关键词: 软土地区; 筑岛围堰; 超深基坑; 钢管桩

中图分类号: TU47 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2012)S0-0773-06

作者简介: 刘 涛 (1979-), 男, 山东高唐人, 博士, 从事地下工程与隧道研究。E-mail: ltmilan@163.com。

Case study of ultra-deep foundation pit by island and cofferdam construction in soft soils in coastal areas

LIU Tao¹, CHEN Yun-bin¹, LIU Hao²

(1. College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. China Railway SIYUAN Survey and Design Group, Wuhan 430063, China)

Abstract: By means of the island and cofferdam construction method, the ultra-deep foundation pit under ultra-deep soft soils in coastal areas is analyzed, based on the cross-sea tunnel project of the new campus of University of Macau on Hengqin Island. The design selection and construction method of the foundation pit are introduced. Based on the measured data, the deformation rules of foundation pit support system are discussed. It may offer valuable reference for the design and construction of ultra-deep foundation pits in coastal areas in future.

Key words: soft soils area; island and cofferdam construction; ultra-deep foundation pit; steel pipe pile

0 引言

滨海软土地区采用海上筑岛围堰明挖法的超深基坑工程, 相比一般的基坑工程而言, 其设计及施工难度都大得多, 充足的地下水补给以及软黏土地层的高蠕变、低渗透特性, 带来了基坑降水困难等一系列问题^[1-3]。本基坑范围内承压含水层的存在, 也加大了基坑施工的风险。由于是海上作业, 加之受工期限制基坑将会采取大面积全断面开挖的基坑开挖方式, 基坑施工过程中的超载情况将会十分普遍, 对支护体系会产生较大的影响。对该基坑工程的分析研究具有重要的现实意义, 可以为今后类似基坑工程的设计、施工提供一定的借鉴。

1 工程概述

澳门大学新校区跨海隧道位于珠江口西岸的珠海与澳门之间的横琴岛十字门水道, 连接珠海横琴岛与澳门三岛之一的氹仔岛, 建成后为澳门大学新校区师

生专用。隧道全长 1528 m (隧道走向如图 1), 由横琴岸上段、跨海段、澳门岸上段 3 段组成, 其中跨海段采用围堰明挖法修建, 为本文研究对象。基坑深度原河床面起算为 16~25 m, 支护长度约 530 m, 隧道所处十字门水道平直、浅平, 地势低平, 河面宽约 560 m, 海水深度为 0~3.8 m。

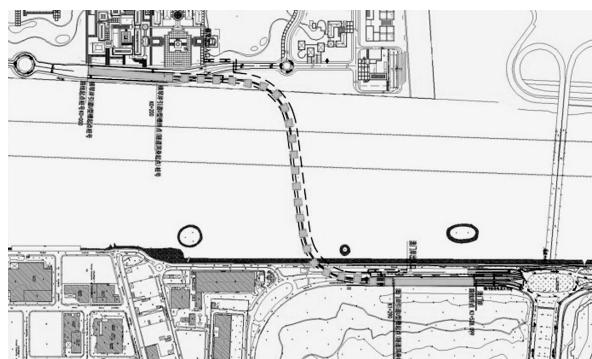


图 1 澳门大学横琴校区过海隧道平面图

Fig. 1 Plan view of cross-sea tunnel

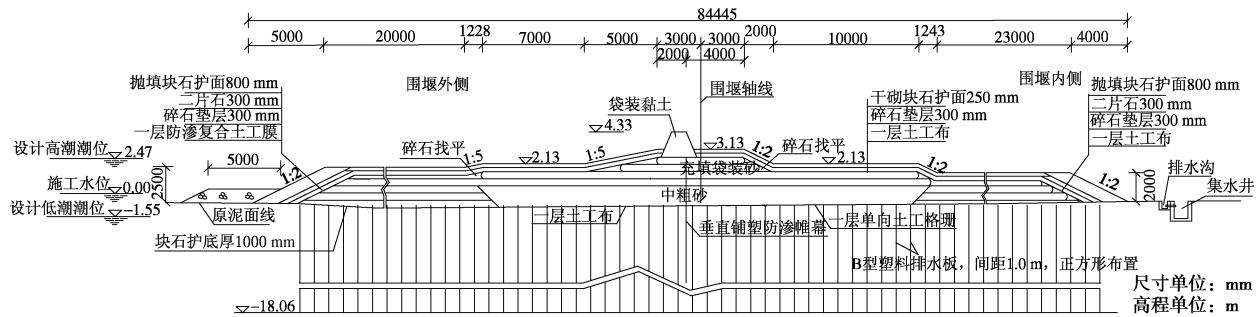


图 2 围堰断面型式

Fig. 2 Section of cofferdam

2 工程地质条件

2.1 地质条件

建筑场地地貌单元属横琴丘陵滨海平原地区，钻探揭露显示，选址处地层结构可分为为人工回填的素填土①，第四系全新统海陆交互相沉积层②、第四系全新统冲积层③、第四系花岗岩风化残积土④、燕山晚期花岗岩⑤。场地各土层的部分物理力学性质指标见表 1。

表 1 土层参数

Table 1 Parameters of soils

土层名称	平均层厚/m	重度 /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 φ /($^{\circ}$)
素填土① ₁	2.76	—	5	18
细砂① ₂	4.23	19	0	20
淤泥②	10.63	16	3.7	3.4
黏土③ ₁	6.54	19.4	20.3	12
淤泥质土③ ₂	5.38	17.8	12.2	9.6
细中砂③ ₃	2.35	19.5	0	25
黏土③ ₄	4.26	19.3	19.8	11.8
淤泥质土③ ₅	6	16.4	12	9.9
中粗砂③ ₆	5.16	20.5	0	31
黏土③ ₇	4.77	19.2	29.1	14.2
淤泥质土③ ₈	8.08	17.7	9.1	7.2
砾砂③ ₉	12.98	26.5	0	36

2.2 水文地质特征

本工程地下水主要为赋存于第四系砂层和砂砾层中的孔隙潜水、孔隙承压水以及分布于基岩风化带的基岩风化裂隙水，水量丰富。地下水位埋深为 0.8~2.5 m，潜水主要靠海水及大气降水补给，基岩风化裂隙水主要由第四系砂层越流补给。场地地下水位于Ⅱ类环境中，对混凝土结构具微腐蚀性，对混凝土中的钢筋具中等腐蚀性。

3 隧道方案优化选型

隧道施工工法的选择需要综合考虑现场的场地条

件、地质水文条件、两岸建设环境和隧道功能需要、经济合理性、工期等方面的要求。结合所建隧道实际情况，初步选定了以下 3 种海底隧道施工工法进行比选^[4]：

(1) 盾构法。盾构法在深堆积层等软弱的不透水层中最为适用，由于盾构机单体成本高，在隧道长度较大时（一般超过 3 km）才能发挥其经济效能，但本隧道较短、且断面大，另外，盾构机较长的制作周期也是本工程工期所不允许的。

(2) 沉管法对水深、流速等要求较高，且沉管隧道的基槽开挖和爆破会对河道和生态带来不利影响，本隧道所处水域水深较浅，不满足沉管管节浮运条件，故需就近建设管节制作船坞，现场不具备此条件。

(3) 筑岛围堰明挖法，相比而言具有断面形式自由，施工简洁、速度快、风险小、工期可控的明显优势，更适于本项目的各项要求。

最终选定筑岛围堰明挖法来修建本隧道，即在选址处一次性修建两条海中围堰，将十字门水道隔断，然后在围堰内排除海水形成干作业施工环境，随后在围堰内进行基坑工程及隧道结构的施工，隧道建设完成后拆除围堰，恢复原有海面。

本次围堰设计采用充填袋装砂堤方案，平行于隧道两侧布设，南北两条围堰总长 1027 m。围堰被设计为斜坡式结构，由护脚棱体、堤心、护面、防渗结构、地基处理结构五部分组成。围堰子堤顶高程 4.33 m，堤顶高程 3.13 m，堤顶宽度 6 m，原泥面高程 0.00~−4.90 m，围堰高 4.33~9.23 m。围堰施工步骤按下列顺序进行：施工准备→铺设地层土工布和土工格栅→铺设 1 m 厚砂垫层→打设塑胶排水板、第一级加载（充填袋装砂）→静载，第二、三级加载（吹填袋装砂）→沉降稳定后施工护面、防渗帷幕（防渗帷幕采用迎水面铺设复合防渗土工膜和堤身设垂直铺塑帷幕墙的联合防渗结构在围堰弯折及与两岸堤岸连接处防渗帷幕采用 $\Phi 1000 @ 800$ 高压旋喷桩）、子堤→围堰运营期监测、管理、维护。围堰断面型式见图 2。

本围堰于 2011 年 10 月初合拢，截至目前为止，

在运营期间围堰的变形及防渗均控制在设计要求之内, 为基坑工程的施工提供了良好的作业环境, 解除了基坑施工的后顾之忧, 围堰使用状况如图3。



图3 围堰使用状况

Fig. 3 Service condition of cofferdam

4 基坑支护方案

4.1 工程重点、难点

从基坑的面积、形状、开挖深度、周边环境、地质条件等方面来看, 本基坑工程施工工具如下特点:

(1) 基坑开挖范围内分布有较厚的淤泥层②、黏土③₁、淤泥质黏土③₂, 均为高压缩性、低强度、流塑性强、自立性差的软土层, 土层性质较差, 不利于基坑开挖及支护。

(2) 本工程地处十字门水域, 地下水补给充足, 兼且开挖范围内淤泥质黏土层、黏土层具有高含水率、低渗透性, 降低该土层的含水率较为困难, 另外, 如何将微承压含水层③₆、③₉水位降至开挖面以下以确保基坑安全也是本工程的一大难点。

(3) 基坑开挖深度大, 最深处达25 m, 属超深基坑范畴, 基坑开挖影响范围较大, 虽然围堰设置在基坑开挖理论影响范围以外, 但仍要充分考虑基坑与围堰的相互作用情况。基坑跨度较大, 最宽处接近35 m, 对内支撑施工工艺的要求较高。

(4) 施工工期要求严苛, 基坑大面积同时开挖以及施工作业平台狭窄的现状所带来的基坑超载问题也是支护方案设计所不能忽视的重要因素。

4.2 支护结构设计

本基坑工程基坑支护体系设计需要考虑的特殊因素: 根据政府出于通航考虑对该隧道工程的要求, 跨海段至少要保证180 m宽的范围内隧道顶板标高不高于-11.8 m, 故航道影响范围内需采用可拆除的临时围护墙体; 为了加快施工进度, 基坑围护墙应优先选择可与围堰同步施工的围护墙种类。综合考虑场地周边的环境条件和岩土工程条件, 基于安全可靠、经济合理、施工便利的原则, 最终选定钻孔灌注桩+内支撑

与钢管桩+内支撑相结合的围护结构体系, 在航道影响范围内采用Φ1300钢管桩围护, 隧道完工后可采用内切除技术将隧道顶板以上部分切除, 航道影响范围外基坑围护桩则采用钻孔灌注桩, 基坑围护平面图如图4所示。内支撑按开挖深度不同分为5~6道支撑, 由1~2道钢筋混凝土支撑与3~4道钢支撑组成。紧邻围护结构外侧插空布置一排Φ800高压旋喷桩, 向外紧邻再布置一排Φ800@600高压旋喷桩, 最外侧布置一排Φ850@600三轴搅拌桩, 共同构成止水帷幕, 帷幕桩与围护桩等深, 在围护桩桩底标高大于-48 m时帷幕桩桩底标高取-48 m, 且所有的桩底应进入③₆层中粗砂以下不少于3 m^[5]。围护体系典型剖面图见图5。

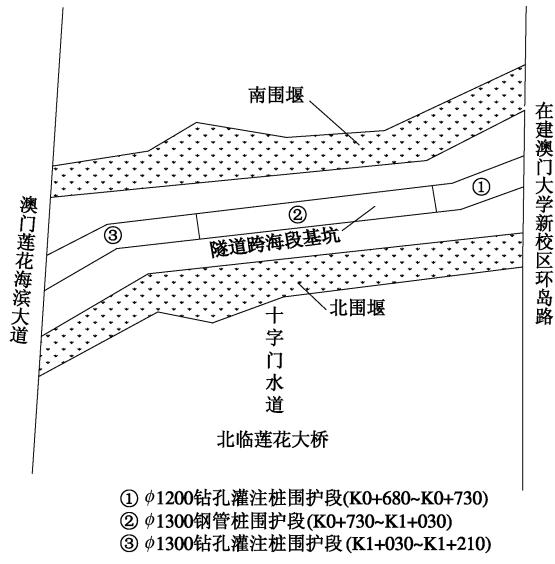


图4 基坑围护平面图

Fig. 4 Plan view of retaining structures

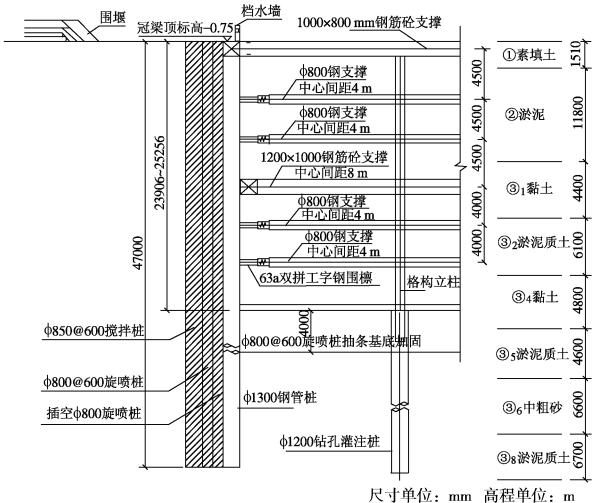


图5 基坑围护体系典型断面图

Fig. 5 Section of retaining structures

4.3 钢管桩

大直径钢管桩常作为桩基础应用于桥梁工程中，技术较为成熟，在基坑工程尤其是超深基坑工程中的应用还较少，就本基坑工程而言，围堰施工期间围堰内与海水连通，在水下作业条件下钢管桩可配合围堰同步施工，对加快施工进度有莫大的帮助，另外其可拆除的特性也满足对通航的要求。本工程采用直径1300 mm、壁厚19 mm的钢管桩，桩长42~53 m，为超长大直径钢管桩，采用Q345甲类或特类镇静钢，由直缝钢管制作，钢管桩结构见图6。钢管桩运输、起吊、沉桩工艺如下：

钢管桩在围堰合拢前由驳船运至工地，用250 t履带吊卸船，按照里程由小到大的打桩顺序堆放与南北钢栈桥之间。钢管桩的起吊由两台250 t履带吊协作完成，以需打桩一侧的履带吊为主吊，对面栈桥上的履带吊为副吊，双机抬吊，交由主吊将钢管桩立直，缓慢吊放至由导向定位架确定的桩位后使其在自重下下沉；待钢管桩下沉稳定后吊机吊住振动锤夹紧钢管桩顶，经检测垂直度与水平度无误后启动振动锤将桩打至导向架上方1 m处，移走导向架后再由振动锤将桩打至设计标高。钢管桩施工流程如图7所示。

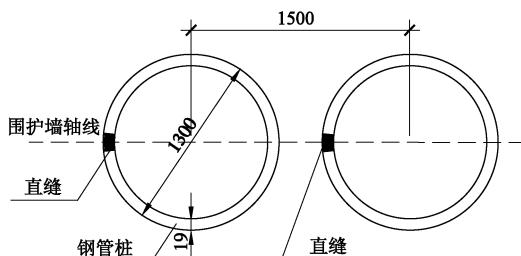


图6 钢管桩结构

Fig. 6 Structure of steel pipe piles

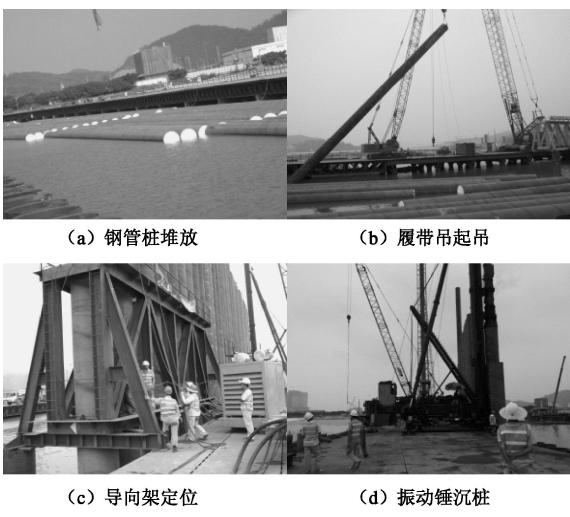


图7 钢管桩施工流程

Fig. 7 Construction process of steel pipe piles

5 基坑降水

本基坑开挖深度较深，开挖范围内分布有较厚的

淤泥层②、黏土③₁、淤泥质黏土③₂，含水率高、渗透性低，难以降低该含水层的含水率。另外，③₆层、③₉层为微承压含水层，③₆层被基坑底板揭穿，③₉层埋藏较深，与底板之间间隔一定厚度的下伏隔水底板，考虑到基坑开挖深度大，为防止基坑突涌，需对上述含水层进行降压。前期工程桩为密集，降水井布置太多的话会影响桩基础的施工，并且由于基坑内支撑设计间距较小、坑内作业净空小，降水井过多亦不利于基坑开挖的顺利展开，多方考虑后在满足降水要求的前提下选择混合井+减压井结合的降水方案，降水深度控制在开挖面以下1 m。共布设坑内混合井60口、减压井85口，坑外深层观测井19口、混合观测井12口，观测井同时作为备用井承担应急抢险任务，降水井平面布置见图8。承压水降水应按照“按需降压”的原则动态减压，以避免对周边环境造成较大影响。相关降水井剖面图见图9。

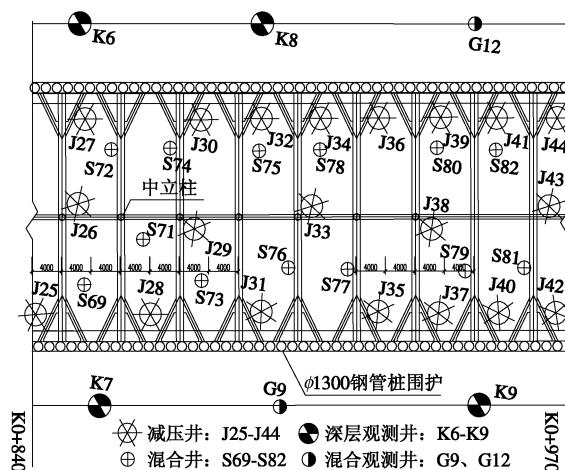


图8 降水井平面布置示意图

Fig. 8 Plan view of dewatering well

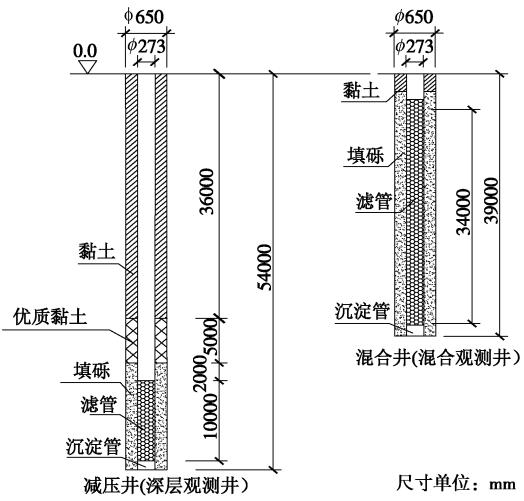


图9 降水井剖面图

Fig. 9 Section of dewatering well

6 基坑开挖方案

(1) 钢栈桥施工

本基坑工程在海床上进行, 地下表层为软弱的厚淤泥层, 故在基坑两侧各修建了一条宽 12 m 的钢栈桥作为各机械的施工作业平台; 围护结构施工完成后为提高基坑开挖、出土功效, 利用围护结构作为支撑点将栈桥向坑内拓宽至 15 m。

(2) 基坑开挖

由于基坑内支撑层距和水平间距较小, 特别是局部第四道或第五道支撑采用双拼支撑, 故根据不同开挖深度采用不同的出土方式, 即横向垂直开挖和纵向分台阶开挖相结合, 分层循环开挖, 局部边角及支撑较密区域采用履带吊(龙门吊)配吊斗出土的方式。综合考虑工期要求、施工总体安排等因素, 确定本基坑开挖施工方案如下: 隧道主体基坑栈桥面以下 14 m 内土体基本为淤泥, 采用 pc120 小型挖掘机倒运, 改良后的长臂挖掘机在基坑顶部两侧钢栈桥上直接挖装, 自卸汽车运输; 14 m 以下土体主要为黏土层, 采用小型挖掘机坑内纵向分台阶倒运至长臂挖机出土范围, 自卸汽车运输。基坑开挖示意图如图 10, 11 所示。

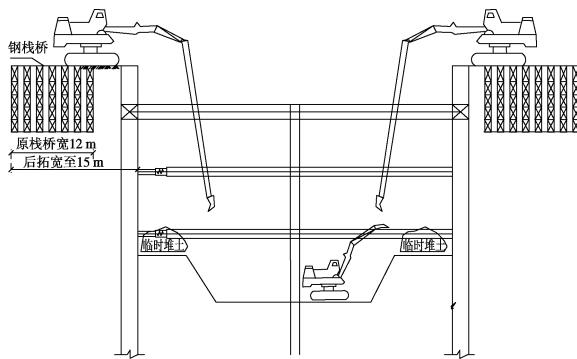


图 10 基坑开挖纵剖面图

Fig. 10 Section of foundation pit excavation

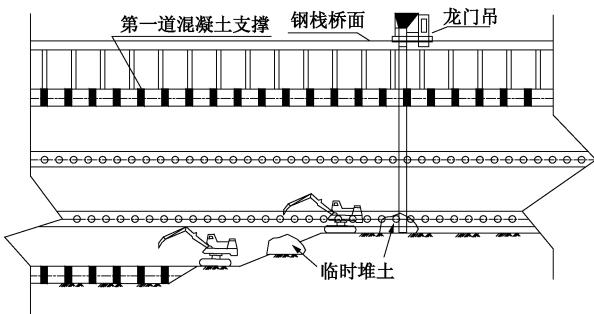


图 11 基坑开挖平面图

Fig. 11 Plane view of foundation pit excavation

7 基坑监测结果分析

为避免基坑工程对工程周边环境及基坑围护本身造成危害, 对本基坑围护体系及周边环境变形情况进行了全面监测。监测项目包括围护结构深层水平位移、支撑轴力、桩顶沉降、立柱隆沉、土压力、地下水位等。部分监测数据分析如下:

(1) 围护桩水平位移

图 12~14 为基坑开挖期间围护墙 CXZ24、CXY24 监测点的测斜实测曲线图, 基坑开挖完成时, 围护墙的最大侧向位移为 74.82 mm, 较理论计算值偏大。从图 12~14 中可以看出, 随着开挖深度的不断增大, 围护墙水平位移的最大值也不断向下移动, 且水平位移的最大值基本处于开挖面附近; 基坑开挖第四~第六层土期间, 围护墙位移增长速率较快, 基坑开挖完成时, 基坑南侧围护墙局部总变形量已超出设计警戒值, 底板浇筑后数据始趋于稳定。初步分析, 五、六层土开挖过程中围护墙变形增大的原因为: ①开挖面为淤泥质黏土, 有效强度小, 流塑性大; ②第五、六道支撑架设滞后于土方开挖; ③钢栈桥钢支撑临时堆载过大。

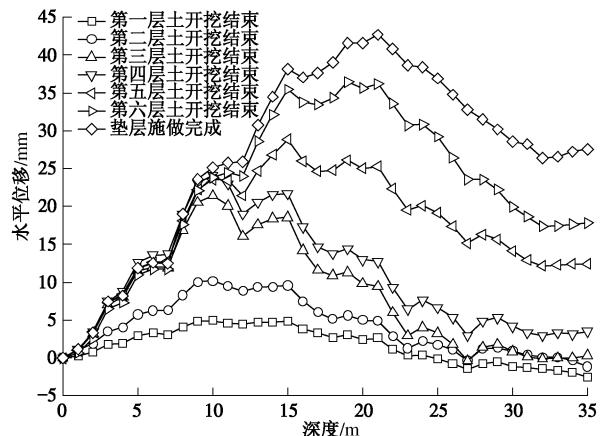


图 12 CXZ24 水平位移变化曲线

Fig. 12 Variation curves of horizontal displacement of CXZ24

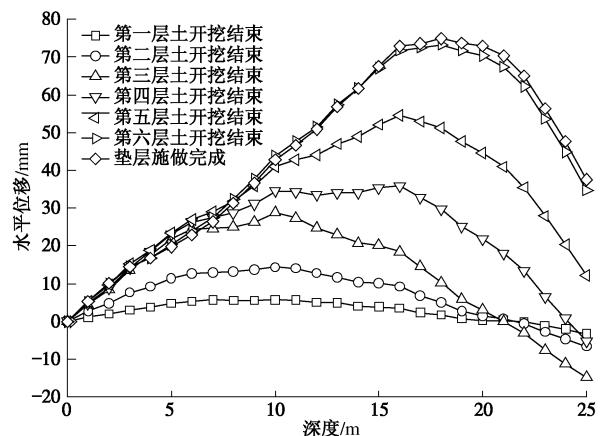


图 13 CXY24 水平位移变化曲线

Fig. 13 Variation curves of horizontal displacement of CXY24



图 14 CXZ24 (18 m 处) 位移随时间变化曲线

Fig. 14 Displacement-time curves of CXZ24(18 m)

(2) 支撑轴力

图 15 为相同监测断面的支撑轴力监测时程曲线。由图中可以看出，第二、三道钢支撑架设后，第一道混凝土支撑轴力值有小幅度减小；第四道混凝土支撑架设后，第一道混凝土支撑轴力大幅度减小；第六道钢支撑（最后一道）架设后，各道支撑轴力值趋于稳定。第一、四道混凝土支撑承担了大部分主动土压力，其对约束围护结构变形起到了关键作用。

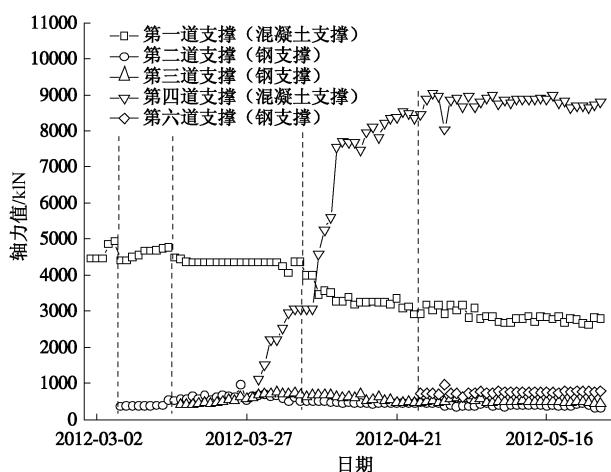


图 15 支撑轴力随时间变化曲线

Fig. 15 Axial force-time curves of strut

8 结 论

本文通过对澳门大学新校区跨海隧道筑岛围堰超深基坑工程的分析研究，得出了以下结论：

(1) 跨度较小的海底隧道 (2 km 以内) 采用筑岛围堰法修建，具有工程造价低、施工速度快、风险小等优势，在工期要求严苛的情况下更应优先选用。

(2) 钻孔灌注桩+钢管桩围护结合多道内支撑的排桩支护支护体系在本基坑工程中得到了较好的应用，工程实践及实测数据表明，该种基坑支护体系应用于滨海软土地地区的超深基坑工程中，在基坑变形控制方面能够取得较好的效果。

(3) 滨海软土地区的基坑工程，基坑降水难度大，降水井密集将会对基坑施工带来不便从而影响施工进度，本基坑工程中混合井的大量使用压缩了降水井所占空间，为基坑施工带来了较大便利。

本基坑工程的成功实施，能够为今后国内类似的滨海软土地区超深基坑工程提供借鉴和参考。

参 考 文 献：

- [1] 吴旭君, 郑平, 赵伟, 等. 滨海地区软土地层超深基坑支护设计实例[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(增刊 1): 388-391. (WU Xu-jun, ZHENG Ping, ZHAO Wei, et al. Support of ultra-deep foundation pits in soft soils in coastal areas[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(S1): 388 - 391. (in Chinese))
- [2] 邸国恩, 黄炳德, 王卫东. 敏感环境条件下深基坑工程设计与实践[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(增刊 1): 383 - 387. (DI Guo-en, HUANG Bing-de, WANG Wei-dong. Design and application of deep excavation in sensitive environment[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(S1): 383 - 387. (in Chinese))
- [3] 陈畅, 戴斌, 王卫东. 上海世博中心基坑工程设计[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(增刊 1): 397 - 403. (CHEN Chang, DAI Bin, WANG Wei-dong. Design of deep foundation pit of Shanghai Expo Center Project[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(S1): 397 - 403. (in Chinese))
- [4] 中国公路工程咨询集团有限公司. 澳门大学新校区跨海通道工程方案设计[R]. 北京: 中国公路工程咨询集团有限公司, 2010. (Highway Engineering Consulting of China. The design of the new campus of the university of macau sea-crossing channel engineering[R]. Beijing: Highway Engineering Consulting of China, 2010. (in Chinese))
- [5] 季大雪, 蒋颖. 澳门大学新校区跨海隧道围护结构设计说明[R]. 武汉: 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 2011. (JI Da-xue, JIANG Ying. The retaining structure design descriptions of the new campus of the university of macau sea-crossing tunnel[R]. Wuhan: China Railway SIYUAN Survey and Design Group Co., Ltd., 2011. (in Chinese))

(本文责编 黄贤沙)