

# 临海复杂砂层的基坑支护隔水帷幕设计与实践

唐 军

(上海现代建筑设计集团申元岩土工程有限公司, 上海 200011)

**摘 要:** 基于厦门某临海项目的基坑工程实践, 介绍了复杂砂土层中的基坑采用的隔水措施。该项目除分布有巨厚砂层外, 地下障碍物众多, 设计采用冲孔咬合桩作为止水帷幕, 大部分区域隔水效果良好, 但局部区域出现渗漏现象。本项目为今后类似项目提供了一定的借鉴经验。

**关键词:** 基坑; 巨厚砂层; 地下障碍物; 隔水帷幕; 冲孔咬合桩

**中图分类号:** TU463

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-4548(2012)S0-0548-04

**作者简介:** 唐 军(1972-), 男, 高级工程师, 主要从事深基坑工程的设计与研究工作。E-mail: tjcentury@126.com。

## Design and construction of water-sealing curtain in deep excavations in sand layer adjacent to sea

TANG Jun

(Shenyuan Geotechnical Engineering Co., Ltd., of Shanghai Xiandai Architectural Design Group, Shanghai 200011, China)

**Abstract:** Based on a project close to sea in Xiamen, the common measures of waterproof curtain are introduced in deep excavation engineering. Under thick sandy layers and underground obstacles, the geological conditions of this project are quite complex, and the interlocking cast-in-situ piles are used. They work well except partial seepage. Experience in the project can be referred for the similar projects.

**Key words:** excavation; thick sandy soil; underground obstacle; waterproof curtain; interlocking cast-in-situ pile

## 0 引 言

随着地下空间的迅速发展, 基坑工程不仅数量增多, 而且向更大、更深的方向发展。在基坑设计与施工过程中, 一个非常重要的问题是基坑隔水。实际工程中许多基坑由于隔水问题处理不当而出现渗漏现象, 对周边环境造成了十分严重的影响, 同时延误工期, 造成了巨大的经济损失, 因此必须引起重视。

在紧邻大海的区域, 浅层通常为较厚的砂土层, 常规水泥土搅拌桩等隔水措施有较多应用案例。但若遇到较复杂的地下障碍物时, 传统隔水帷幕则施工可行性较差。本案例在临海的深基坑中, 一方面砂层巨厚, 另一方面同时存在老围护、海岸抛石、孤石等大量的地下障碍物时, 设计采用冲孔咬合桩支护兼作隔水, 局部与其他隔水措施相结合, 其工程实践对同类工程设计有较大的借鉴和参考意义。

## 1 基坑工程常见隔水措施

基坑工程中常用的隔水措施有基坑内隔水和基坑外隔水。

基坑内隔水由于是基坑开挖后的技术措施, 总体

而言隔水效果一般, 尤其是位于粉土或砂土层中, 因而更多的是作为基坑隔水或地下室防水的辅助措施。基坑内隔水措施主要有: 桩间挂网喷浆, 设置内衬墙等, 可参见图 1。

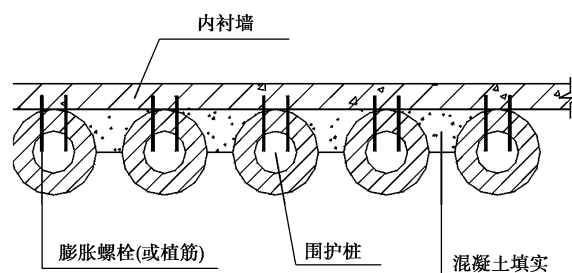


图 1 内衬墙示意图

Fig. 1 Plan of lined wall

基坑外隔水措施是基坑支护设计的常用措施, 也是比较有的技术方法。一般可分为柔性隔水措施、刚性隔水措施及刚柔结合的隔水方式。

柔性隔水措施主要有水泥土搅拌桩(三轴/双轴/单轴)、TRD 工法、高压旋喷桩及注浆等。柔性隔水

措施中,三轴水泥土搅拌桩、TRD 工法在砂土中止水效果较好,双轴水泥土搅拌桩及单轴水泥土搅拌桩次之,旋喷桩及注浆一般在场地条件受限时局部采用。柔性隔水措施具有安全性好、造价低、施工方便等优点,但当场地内存在地下障碍物时或空洞时,隔水桩的成桩质量难以保证。

刚性隔水措施主要有:地下连续墙、钢板桩及混凝土咬合桩等。地下连续墙止水效果好,但工程造价较高且当场地内存在地下障碍物施工困难;钢板桩止水效果较好,但在硬土层中施工难度较大;冲孔咬合桩不受场地条件限制,可穿越地下障碍物施工,但在砂土层中止水可靠性相对低。

刚柔结合的隔水措施则是以上类型的组合,比如地下连续墙加三轴搅拌桩,钢板桩加注浆,咬合桩加旋喷桩等。

在厚砂层中,三轴搅拌桩、TRD 工法、地下连续墙应用较多;而在遇到地下障碍物时,则更多的是采取旋喷桩或咬合桩等容易成桩的施工工艺;在地下存在空洞时,则常用钢板桩等成型桩。当以上情况出现在同一地段时,则对隔水帷幕具有较大的考验。

2 工程概况

本项目设 3 层地下室,基坑面积为 26860 m<sup>2</sup>,开挖深度 15.9~17.4 m。基坑南侧邻近大海约 20 m,且该侧长约 220 m。

2.1 地质情况

本工程场地内土层变化较大,地质情况非常复杂。场地土层工程地质参数如表 1 所示。

表 1 场地土层的工程地质参数  
Table 1 Geological parameters of soils

土层	层厚 /m	重度 /(kN·m <sup>-3</sup> )	φ /(°)	c /kPa	渗透系数 K /(cm·s <sup>-1</sup> )
①-1 杂填土	0.6~6.7	18.0	15.0	5	6.2×10 <sup>-3</sup>
①-2 碎、块石填土	1.7~11.6	19.0	20.0	5	6.2×10 <sup>-3</sup>
①-3 中粗砂素填土	1.0~9.4	18.0	22.0	5	6.2×10 <sup>-3</sup>
②-2 粉质黏土	6.3~12.1	19.0	18.1	17	5.0×10 <sup>-3</sup>
③-1 泥质中粗砂	1~26	19.0	33.0	10	1.0×10 <sup>-2</sup>
④淤泥质土	9.8~21.7	17.5	10.6	13	1.0×10 <sup>-7</sup>
⑦全风化花岗岩	0.8~11.3	19.5	27.0	25	8.0×10 <sup>-5</sup>
⑧砂砾状强风化花岗岩	0.3~20.4	20.5	31.0	28	1.0×10 <sup>-4</sup>
⑨碎块状强风化花岗岩	0.4~11.6	22.0	30.0	45	8.0×10 <sup>-4</sup>

场地地质分布主要呈现以下几个特点:

(1) 场地土层变化较大: 根据场地内土层分布及基岩埋深情况,可将整个场地分为 3 个地质分区,见图 2 地质分区图。

(2) 场地内砂土层分布广泛。地质一区以全、强及中风化花岗岩为主,地质二区较厚的中粗砂层为主,地质三区以厚淤泥质土层为主。

(3) 临近大海的地质二区最为复杂。主要有以下特点: ①基坑开挖范围内土层以碎、块石填土及泥质中粗砂为主,上部填土厚度约 7.2 m,下为约 11.1 m 厚泥质中粗砂层。场地西南角为超厚砂土层,上部为 8m 厚填土,下部为厚度约 25 m 的泥质中粗砂层。中粗砂层透水性极强,渗透系数达 0.01 cm/s,在基坑开挖过程中极易引起管涌、流砂等不良地质现象。见图 3 临海侧典型地质剖面图。②场地南侧临海,原为潮间带,含水率大,且与大海水力联系紧密,地下水位变化幅度较大。地下水位随海水位涨落在黄海高程 0.03~2.45 m 间变动,地下水变化幅度在 0.50~2.06 m 之间。③土层内含有大块的中风化花岗岩孤石、原有驳岸基础及抛石、以及老围护等地下障碍物,地下障碍物埋深约 5~12 m,直接清除存在较大的困难。地下障碍物之间可能存在一定的空隙。

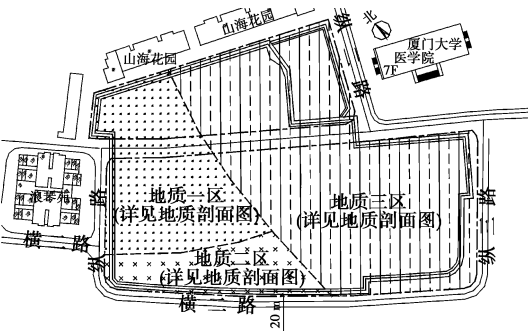


图 2 地质分区图  
Fig. 2 Plan of geological division

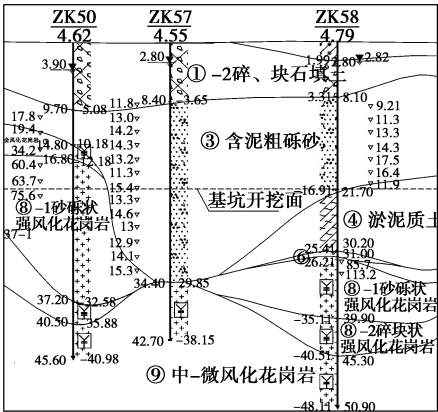


图 3 临海侧典型地质剖面图  
Fig. 3 Typical geological section close to sea

3 基坑围护设计

3.1 基坑隔水设计

本工程基坑开挖深度内砂土层较厚，土层透水性能好，渗透系数大，基坑开挖时易产生流砂、管涌等不良地质现象；基坑南侧临近大海，与大海水力联系紧密，土层含水率丰富，地下水位会随着潮汐变化而改变。这些因素对本工程基坑隔水安全产生较大的影响，因此隔水措施必须可靠。

由于场地内存在大量的孤石、抛石及原有驳岸基础等地下障碍物，常规的水泥土搅拌桩、旋喷桩等止水帷幕施工难度较大且无法保证空洞处的成桩质量，地下连续墙施工困难且造价较高。综合考虑安全、经济及施工可行性等各方面因素，设计单位采用冲孔咬合灌注桩止水措施：在围护冲孔灌注桩（配筋）之间设置  $\Phi 800$  冲孔灌注桩（素桩）咬合，结合开挖深度及桩身垂直度要求，咬合搭接 250 mm。冲孔灌注桩（素桩）采用 C20 超缓凝混凝土，围护冲孔灌注桩（配筋）采用 C30 水下混凝土。并在局部接缝处设置  $\Phi 600$  高压旋喷桩。具体如图 4 所示。

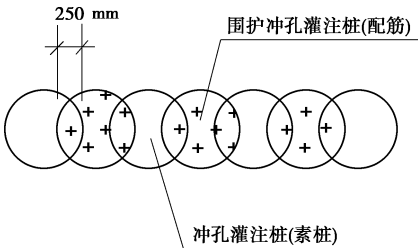


图 4 冲孔咬合灌注桩平面布置示意图  
Fig. 4 Plan of interlocking cast-in-situ pile

同时，为确保隔水安全，在基坑内侧设置挂网喷浆措施，分层开挖分层设置，以减小基坑长时间暴露的渗水风险。

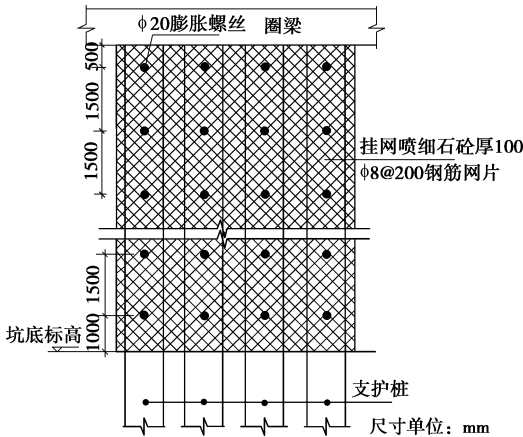


图 5 基坑侧壁挂网喷浆剖面大样图

Fig. 5 Section of sprayed reinforced concrete

咬合桩是采用灌注桩机施工形成的桩与桩之间相

互咬合排列的一种基坑支护结构。通常采用全钢筋混凝土桩排列或钢筋混凝土与素混凝土交叉排列两种形式。素混凝土桩采用超缓凝混凝土先期浇筑；在素混凝土桩的混凝土初凝前利用套管钻机的切割能力或冲孔锤的冲击力切割掉相邻素混凝土桩相交部分的混凝土，然后浇筑钢筋混凝土

在遇到地下障碍物时，由于咬合桩采用钢护筒，可吊放作业人员进入孔内清除障碍物，或采用冲击锤清除障碍物。因此地下障碍物不会影响咬合桩的施工。

钻孔咬合桩施工时需控制好桩的垂直度，防止因素混凝土桩垂直度偏差较大而造成与钢筋混凝土搭接效果不好，甚至引起基坑漏水。在软弱土层及易发生管涌地层中，咬合桩成孔的难度较大<sup>[2]</sup>。

3.2 隔水效果

咬合桩采用素混凝土桩与钢筋混凝土桩交叉排布的形式，混凝土的初凝时间控制及垂直度控制是影响成孔质量的关键技术。咬合桩结构防水的薄弱环节是咬合面<sup>[3]</sup>，在采用钻孔咬合桩的工程中渗漏现象通常发生在咬合桩搭接处。

本工程采用钻孔咬合桩止水帷幕，在基坑开挖过程中，大部分区域止水效果良好，围护桩体未出现渗漏现象。但在基坑开挖至第二道支撑底标高附近时（地面以下约 10 m），基坑靠大海侧个别点出现了渗漏现象。该渗漏点在短时间迅速扩大，形成较大的渗漏通道。

由于临海，地下水位与海水相通。基坑围护体渗透与海水涨落有密切的联系。根据现场记录，随着海水涨潮，基坑渗漏处涌水量也会增大；随着潮水退落，基坑渗漏处涌水量也会减小。

3.3 基坑渗漏原因分析

本工程基坑局部出现流砂现象的原因主要有地质因素与施工因素两个方面。

地质因素：①场地 8 m 以下约为 15~25 m 的巨厚含泥粗砾砂层。②浅层 8 m 内含有大量条石、块石、碎石及原有驳岸施工的遗留老桩基础等地下障碍物。钻孔咬合桩在地下障碍物土层中施工垂直度较难控制，从而影响钻孔咬合桩的成桩质量，易发生流砂现象。③由于海水的持续冲刷，浅层 10~15 m 土层范围内可能存在多处空洞。在水压力作用下，地下水易通过土层中空洞易渗流到基坑内，引发基坑流砂现象发生。

施工因素：①基坑长时间暴露，土体发生蠕变变形，变形增大引起咬合桩开裂，导致渗漏。②工程桩施工爆破的冲击力，引起咬合桩开裂，导致渗漏。本工程的工程桩采用深井灌注桩，由于场地土层中含有大量中风化花岗岩孤石，在施工工程桩时需采用爆破方式凿除工程桩内孤石，爆破产生的冲击力会破坏咬合桩的整体性，引起咬合桩的开裂，使围护体发生渗

漏。③工程桩施工的降水, 加大了坑内外水力差, 增加了渗漏风险。④施工过程中咬合桩的咬合处若搭接不好, 通常会成为基坑渗漏易发处。

由于以上因素, 冲孔咬合桩在施工和使用过程中受到影响, 素混凝土桩与钢筋混凝土桩咬合质量降低, 导致基坑局部点出现流砂现象。



图 6 坑内孤石爆破实拍图

Fig. 6 Boulder bursting in excavation

### 3.4 隔水帷幕加强措施

基坑围护体局部出现渗漏后, 采取了土方回填及坑内漏水点四周堆砌沙袋, 预埋钢管进行疏导水流, 并在坑外注入水玻璃的措施进行封堵, 暂时有效地控制了渗漏的进一步发展。

为防止基坑围护体再次发生渗漏现象, 设计单位对隔水帷幕采取了加强措施: 在临海侧渗漏严重处, 原支护桩外 1~2 m 设置小趾口 18~21 m 拉森钢板桩, 并在钢板桩与原支护桩之间增设高压旋喷填充。由于地下障碍物众多, 且渗漏已可能导致部分区域形成了较大的空洞, 因此, 拉森钢板桩采用 VI 高强度型, 且采用 160T 高频振动锤压桩。钢板桩的压入, 快速切断了渗漏通道, 大幅减小了基坑渗水量, 同时为高压旋喷桩的补桩施工形成了屏障, 保证了旋喷桩的施工质量。

隔水帷幕加强后, 有效地控制了基坑围护体的流砂现象, 并且在基坑后续施工过程中未发现明显的渗漏现象。

### 3.5 基坑监测

根据基坑监测情况, 基坑开挖期间, 围护桩顶位移、围护桩测斜、支撑内力、立柱回弹等基本未超出报警值。

临海一侧, 桩顶位移随海水潮汐变化, 呈往复变化, 日变量基本在  $\pm 2$  mm 内, 累计位移值在 15~35 mm 之间。

临海一侧, 坑外水位随海水潮汐变化, 呈往复变化, 一般日变量 0.1~0.8 m 之间。个别点渗漏期间临近的水位监测点 SW6 变化较快, 最大日变量达 1.5 m。

渗漏封堵后, 水位快速恢复。该期间个别点地表沉降日变量也达到 3.6 mm, 但临海驳岸变形在报警值内。

## 4 结 论

本工程基坑规模较大, 地质条件相当复杂, 基坑围护设计和施工面临了较大的困难。由于地质及施工条件的复杂性, 局部区域在施工过程中出现的了渗漏现象。基坑隔水帷幕的合理设计及后期及时的抢救措施, 有效地保证了基坑工程的安全, 确保了该工程的顺利实施。

(1) 在基坑设计施工前应对周边的环境和地质条件进行详尽调查, 周边环境和地质情况是决定基坑隔水帷幕设计选型的重要条件。

(2) 冲孔咬合桩与其他隔水措施相结合, 在复杂厚砂土层中隔水效果明显。在采用冲孔咬合桩作为隔水帷幕时, 应严格控制素混凝土桩与钢筋混凝土的搭接质量, 在施工过程中减少对咬合桩的破坏。

(3) 基坑临海时, 应考虑海水水位变化对隔水帷幕施工以及基坑开挖过程的影响。

(4) 基坑一旦出现渗漏, 应及时采取有效应急措施及隔水补强方案, 可防止渗漏进一步发展。

(5) 应重视信息化施工, 针对项目实施情况, 有针对性地调整隔水帷幕设计, 确保基坑及周边环境的安全。

### 参考文献:

- [1] 刘国斌, 王卫东. 基坑工程手册[M]. 2 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009: 452 - 453. (LIU Guo-bin, WANG Wei-dong. Excavation engineering handbook[M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture and Building Press, 2009: 452 - 453. (in Chinese))
- [2] 陈 斌, 施 斌, 林 梅. 南京地铁软土地层咬合桩围护桩的技术研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(3): 354 - 357. (CHEN Bin, SHI Bin, LIN Mei. A study on the scents pile in soft soil for Nan jing metro project[J] Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(3): 354 - 357. (in Chinese))
- [3] 杨建学, 侯伟生, 等. 冲孔咬合桩在某临海深基坑围护中的工程应用[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(7): 207 - 209. (YANG Jian-xue, HOU Wei-sheng. Application of linked piles in deep foundation pit in a coastal area[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(7): 207 - 209. (in Chinese))

(本文责编 孙振远)