

# 沙漠地区地下水上升机理及防水设计方法\*

田 伟

(上海中建海外发展有限公司,上海 200125)

[摘要] 针对沙漠地区人类活动引发的地下水集聚对地下工程的侵蚀问题,分析了沙漠地区地下水集聚机理。沙漠地区地质构造中隔水层的空间分布特征是地下水赋存的必要条件,结合地表水入渗类型及渗透量的综合分析,构建了沙漠地区地下水上升速度的计算方法,并根据地下水的上升速度确定地下结构的防水使用环境类别。结合沙漠地区地基砂土的化学分析,根据建筑设计使用年限,提出了以动态防水与防腐协同作用的防护体系设计方法,为提升沙漠地区地下工程的耐久性提供了理论支撑,可有效解决沙漠地区地下水上升引发的地下结构问题。

[关键词] 地下工程;沙漠地区;地下水;隔水层;防水;防腐;设计

[中图分类号] TU761.1<sup>+</sup>1

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)24-0121-06

## Mechanism of Groundwater Rise and Waterproofing Design Methods in Desert Areas

TIAN Wei

(China State Construction Overseas Development Co.,Ltd., Shanghai 200125, China)

**Abstract:** This paper addresses the issue of groundwater accumulation caused by human activities in desert areas and its hazards to underground structures, the mechanism of groundwater accumulation in desert areas is analyzed. The spatial distribution characteristics of aquiclude within desert geological structures are identified as a necessary condition for groundwater retention. By integrating quantitative analysis of surface water infiltration types and seepage volumes, a calculation method for groundwater rising velocity is established. Based on the groundwater rising velocity, the waterproofing environmental categories for underground structures are determined. Combined with chemical analysis of sands in desert foundations and considering the designed service life of buildings, a protective design method based on the synergy of dynamic waterproofing and anti-corrosion mechanisms is proposed. This research provides theoretical support for enhancing the durability of underground engineering in desert areas, which can effectively solve underground structure problem caused by groundwater rising in desert areas.

**Keywords:** underground works; desert areas; groundwater; aquiclude; waterproofing; anti-corrosion; design

### 0 引言

在“一带一路”倡议推进下,沙漠地区基础设施建设规模持续扩大。长期以来,人们对沙漠地区地下工程防水体系设计存在认知误区,认为沙漠地区年均降水量<100mm的干旱环境无需防水措施。然而近年来工程实践表明,人类活动正深刻改变沙漠地区的水文环境:农业灌溉、景观绿化用水及市政管网渗漏形成复合补给源,形成区域性浅层地下

水。由于地下水上升,沙漠土壤中存在的  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  溶解于地下水中,导致地下结构腐蚀速率较干旱环境提升 5~8 倍,对未进行防水及防腐蚀保护的地下结构及埋藏在沙漠中的建筑遗产产生了侵蚀,直接经济损失巨大<sup>[1]</sup>,凸显研究沙漠地区地下水侵蚀防控的紧迫性。本文通过研究沙漠地区地下水集聚机理,以及由于人类活动产生的生产生活用水下渗引起浅层地下水上升速度的计算方法,确定沙漠地区地下结构在设计使用周期内的防水防腐协同设计方法。

### 1 沙漠地区地下水集聚机理

地下水作为全球水文循环的重要组成部分,其

\* 中建八局 2025 年度科技研发项目(2025-4-04)

[作者简介] 田 伟,博士,正高级工程师,国家一级注册结构工程师,国家一级注册造价工程师,国家注册咨询工程师(投资),国家一级注册建造师,E-mail:vannytian@163.com

[收稿日期] 2025-04-16

赋存过程受区域地质构造、气候特征及水文循环系统的协同作用。常规水文系统中,地下水的补给来源通常包含大气降水入渗补给、地表水体渗漏补给及地质构造储水补给三大途径。在极端干旱的沙漠地区,地下水产生机理呈现显著的特殊性。沙漠地区年均降水量普遍<100mm,降水入渗深度通常≤2.0m,且在强烈蒸发作用下快速消散,难以对地下水形成有效补给。沙漠地区特有的水汽冷凝作用产生的凝结水补给量少且易蒸发。天然地表水体稀缺且多为季节性,深层构造储水储量有限且埋深>200m,难以参与近地表水循环。因此,人类活动产生的持续性下渗补给(包括农业灌溉回渗、市政绿化灌溉下渗、市政管网渗漏等)成为沙漠地下水主要补给来源。沙漠地区地下水的赋存还需特殊地质条件,如在浅层无滞水地质构造,则下渗水将继续下渗到数百米的地下,无法集聚形成地下水。只有浅层存在连续分布的隔水层(如黏土、泥岩和玄武岩等低渗透性岩层),人工补给水源才将在隔水层以上形成区域性滞水层,并逐步集聚形成地下水。

人类活动引起的沙漠地区地下水集聚需满足 2 个关键性水文地质条件,其本质在于有效的地下水赋存地质构造和持续的下渗水量动态集聚。

1)地质构造需具备完整的隔水-储水结构体系,隔水层应具有低渗透特性,以黏土层、致密泥岩层或玄武岩层等低渗透性地层为佳。这类隔水层在竖向可有效阻滞下渗水流,避免进一步下渗。同时,隔水层还需具备区域性连续分布特征,其平面分布完全覆盖地下水补给区。理想的构造形态应呈“盆地式”或“槽状”结构,侧向边界需被断层或岩性界面封闭,形成天然的储水构造。

2)满足地下水系统的水量集聚要求,即区域地下水的年总补给量(包括降水入渗、地表水渗漏等)大于年总排泄量(包括蒸发量、蒸腾量及深层渗透等),以保持地下水的动态平衡和稳定增长。

2 沙漠地区地下水集聚的地质条件

沙漠地区地下水赋存的核心控制要素在于隔水层的存在。在长期的风力侵蚀与堆积作用下,沙漠地区形成了独特的岩层结构和隔水层分布特征,沙漠地区具备优异隔水性能的岩层主要包括以下类型。

1)细粒沉积岩类。泥岩与页岩作为典型的古湖泊相或河漫滩相沉积产物,其黏土矿物含量>50%,孔隙度普遍<5%,微观结构呈定向排列,渗透系数达到  $10^{-9}$ cm/s 量级<sup>[2]</sup>,致密的结构使其具备天

然的阻水性能,构成天然水力屏障。

2)致密碎屑岩类。胶结良好的砂岩通过硅质或钙质胶结作用形成连续基质,有效充填原生粒间孔隙。当此类岩层的胶结物含量>25%时,渗透率可下降 2~3 个数量级<sup>[3]</sup>,具备显著隔水效应。

3)碳酸盐岩类。未风化灰岩因方解石重结晶作用形成致密结构,初始孔隙度通常<2%,但在构造裂隙发育区需注意其透水性的各向异性特征。

4)火成岩与变质岩类。玄武岩和石英岩作为高抗压强度岩体,其原生节理闭合度高,次生风化壳发育程度低,形成致密的刚性隔水体,在区域构造稳定区可形成稳定的隔水结构。

工程实践表明,黏土层在特定水文地质条件下可形成高效水力屏障。通过原位渗透试验发现,黏土层遇水后会显著发生晶格膨胀效应,其自由膨胀率可达 120%~280%,孔隙结构发生重塑,微观结构重组形成致密叠片构造。该物理化学作用使材料渗透系数由  $10^{-5}$ cm/s 量级骤降至  $10^{-9}$ cm/s 量级以下,实现动态自密封效应<sup>[4]</sup>,形成具有自修复功能的隔水屏障,长期抗渗稳定性良好。

判定沙漠地区隔水层性能需综合多维度指标,其核心评价指标体系主要包含以下要素。

1)渗透性能指标。隔水层的渗透性能指标是评价其阻隔效能的重要参数,有效隔水层的渗透系数应< $1\times10^{-7}$ cm/s。同时,隔水层需在长期渗流压力作用下保持渗透稳定性,包括抵抗地下水溶蚀、化学腐蚀、微生物等作用。

2)结构特征指标。隔水层的结构特性指标主要是指结构完整性和连续性。结构完整性系数为用于量化岩石内部结构完整性的参数,反映其裂隙、孔隙、胶结程度等对整体力学性能和稳定性的影响程度。有效隔水层的结构完整性系数  $K_v>0.7$ ,采用声波测试法确定,确保无贯穿性导水通道。同时,连续性评价要求隔水层在平面上连续分布面积覆盖目标区域 1.5 倍以上。

3)有效厚度指标。有效隔水层厚度  $t$  需满足最小厚度要求,根据渗流场数值分析、垂直渗透方向的厚度要求,黏土层需满足  $t\geq5$ m,岩层需满足  $t\geq3$ m。对于存在夹层的复合隔水层,可计算等效厚度,等效厚度可按下式计算:

$$H_{eq} = \sum k_{ref} \cdot \frac{h_i}{k_i}$$

(1)

式中:  $H_{eq}$  为等效厚度;  $k_{ref}$  为参照标准隔水层渗透系数,可取  $1\times10^{-7}$ cm/s;  $h_i$  为第  $i$  层隔水层厚度;  $k_i$  为第  $i$  层隔水层的渗透系数。

4) 耐久性指标。隔水层的抗风化能力对其稳定性至关重要,风化作用对隔水层关键参数渗透系数具有重要影响,风化导致原生裂隙扩大或新生次生裂隙,形成渗流通道,使渗透性增大,中等风化以下的可认为隔水性能良好。

在实际地质勘察中,需结合地层产状、断裂发育程度、地层厚度及风化程度进行隔水性能综合评价,满足上述指标的岩层或黏土层可认为是天然的隔水屏障。人类活动产生的垂向入渗水流在隔水层界面发生侧向径流,隔水层隔绝了水流的进一步下渗,形成典型的上部滞水型含水结构,引起沙漠地区浅层地下水的集聚和上升。

3 沙漠地区地下水上升趋势分析

3.1 地下水补给分析

沙漠地区地下水补给是多源复合过程,其补给量受气候、地质及人类活动共同影响。沙漠地区地下水的补给主要源于两大途径,即自然降水补给、人类生产生活用水补给。在沙漠地区,受限于干旱气候,自然降水所产生的补给量极为有限,年均降水量<100mm,绝大部分均快速蒸发到大气中,其对地下水补给的贡献可忽略不计。在昼夜温差>20℃的沙漠腹地,年凝结水量可达 15~30mm,但受包气带毛细阻滞效应限制,此类补给主要发生在表层砂土 50cm 范围。在人类生产生活用水中,绿化灌溉是地下水的主要补给来源。沙漠地区砂土的高渗透系数( $k=10^{-4} \sim 10^{-3} \text{ cm/s}$ )可使部分灌溉用水快速下渗转化为地下水补给。此外,诸如市政管线破损导致的地下水渗漏等偶然因素,也可能成为地下水补给来源,但此类情况具有偶发性,并非主要补给方式。

绿化灌溉用水除了被植物吸收和大气蒸发外,其余部分渗入地下,下渗比例受气候条件、灌溉方式、土壤特性及植被类型影响。沙漠地区砂土渗透性强、保水能力差,灌溉用水通过深层渗漏流失的比例相对于其他区域要高。一般情况下,沙漠地区的灌溉用水损耗情况为:植物蒸腾占比 20%~30%,大气蒸发占比 30%~50%,深层渗透占比 20%~30%<sup>[5]</sup>。

为减少绿化灌溉用水的下渗,可采取以下措施控制下渗量:优化灌溉技术,采用滴灌或微灌技术实现精准灌溉,精准灌溉直接向植物根部供水,配合土壤湿度传感器,根据植物需水量动态调整,实现按需精准灌溉,避免过量灌溉,从而减少深层渗透;改良土壤结构,在砂土中添加黏土、混合保水剂或有机质,提高土壤保水能力,减少下渗;铺设防渗膜,即在植物根系下方铺设防渗膜,阻断水分下渗

通道。

3.2 浅层地下水位变化分析

浅层地下水位的变化主要取决于上部补水量、隔水层渗透性能、砂土孔隙率和地下水集聚时间等,综合考虑上述因素得出浅层地下水上升速度的计算公式:

$$\sum W_{s_i} = \sum W_{i_i} + \sum \theta_{\text{sat}} A_i v_i t_i \quad (2)$$

式中:  $W_{s_i}$  为上部补水量;  $W_{i_i}$  为地下水通过隔水层的下渗量,对于性能良好的隔水层,可考虑通过隔水层的下渗量为 0;  $\theta_{\text{sat}}$  为土壤的饱和体积含水率,饱和体积含水率是土壤孔隙完全被水充满时的含水率,即单位体积土壤中水的体积占比;  $A_i$  为计算区域土壤的面积;  $v_i$  为地下水的上升速度;  $t_i$  为地下水的集聚时间。

饱和体积含水率表征土壤所有孔隙均被水占据的状态,因此饱和体积含水率等于孔隙率,即  $\theta_{\text{sat}} = n$ 。根据孔隙率计算饱和体积含水率,饱和体积含水率计算公式如下:

$$\theta_{\text{sat}} = n = \frac{V_v}{V_t} \times 100\% = \frac{V_v}{V_v + V_s} \times 100\% \quad (3)$$

式中:  $n$  为孔隙率,孔隙率是土壤中孔隙体积占土壤总体积的比例,反映土壤的疏松程度或密实程度;  $V_v$  为孔隙体积,包括气体和液体占据的空间;  $V_t$  为土壤总体积;  $V_s$  为固体颗粒体积。

沙漠地区隔水层以上土壤主要为砂土,且在工程施工过程中经过机械压实,沙漠地区压实砂土的孔隙率一般为 30%~40%,具体取决于初始孔隙率、压实程度、颗粒级配和施工工艺。在工程中可采用环刀法或压力板仪测定压实砂土的孔隙比,根据孔隙比计算孔隙率;也可测量土壤密度和干密度,计算得到砂土的孔隙比,进而推算得出孔隙率。

4 防腐蚀分析

沙漠地区砂土中的可溶性氯盐和硫酸盐物质对地下工程构成显著威胁。随着沙漠地区地下水位上升,土壤含水率增加促使腐蚀性离子溶解活化,形成具有侵蚀性的氯盐-硫酸盐复合型地下水环境。其中,  $\text{Cl}^-$  对钢筋的腐蚀作用尤为突出:  $\text{Cl}^-$  的电化学腐蚀破坏钢材表面的钝化膜,产生催化效应,使腐蚀速率提升 3~5 倍,当  $\text{Cl}^-$  浓度超过临界阈值(通常为 0.2%~0.4%)时,金属铁的腐蚀进入自催化阶段<sup>[6]</sup>。  $\text{SO}_4^{2-}$  的腐蚀活性随含水率的增长而增强,  $\text{SO}_4^{2-}$  与混凝土中的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  发生硫酸盐侵蚀反应,生成石膏和钙矾石晶体,导致混凝土结构产生膨胀性裂缝。沙漠地区随着地下水位上升,地下



水和腐蚀性离子的协同效应要求地下结构在防水的同时必须同步考虑结构防腐。

沙漠地区地下结构的防腐需采取“材料优化 + 结构防护 + 外部防护 + 环境控制”多维度措施,结合具体环境等级和设计年限,确保长期耐久性。地下结构的防腐措施主要如下。

4.1 材料优化

1) 混凝土:采用高性能混凝土,即强度等级 C35 以上混凝土,掺加硅灰、粉煤灰等矿物掺合料,降低水泥用量以减少收缩开裂风险;添加钢筋阻锈剂,在混凝土中加入氨基醇类非膨胀型阻锈剂,形成保护膜,抑制钢筋锈蚀;控制  $\text{Cl}^-$  含量,混凝土拌合物中  $\text{Cl}^-$  含量控制在 0.06% 以下,在强腐蚀环境下控制在 0.03% 以下,避免钢筋锈蚀。

2) 钢筋:采用环氧涂层保护钢筋,适用于中、强腐蚀环境,环氧涂层厚度一般  $>250\mu\text{m}$ ;采用不锈钢钢筋,在极强腐蚀环境下优先采用不锈钢钢筋。

4.2 结构防护

1) 增加混凝土保护层厚度:根据腐蚀等级增加混凝土保护层厚度,强腐蚀环境中混凝土保护层厚度  $>50\text{mm}$ 。

2) 控制结构裂缝:在受力较大部位,如节点部位增加钢筋网,避免应力集中引起的裂缝,同时提高构件配筋率,采用小直径钢筋,减少结构裂缝;优化混凝土配合比,降低水化热,减少温度应力裂缝和收缩裂缝,避免腐蚀介质渗透。

4.3 外防护措施

1) 涂层保护:采用环氧树脂、氟碳涂料,形成地下结构的外部防腐隔离层。

2) 硅烷浸渍:提高混凝土表面憎水性,阻止  $\text{Cl}^-$  渗透。

3) 设置隔离层:在结构外围设置高密度聚乙烯膜(HDPE 膜),涂刷沥青、聚合物水泥砂浆等形成防腐隔离层。

4.4 环境控制

1) 回填材料选择:采用中性黏土或级配砂石回填,避免酸性土或盐渍土直接接触结构。

2) 电化学保护:采用牺牲阳极法或外加电流法,通过向被保护结构施加阴极电流从而抑制钢筋锈蚀。

3) 排水系统:采用级配碎石回填盲沟与穿孔排水管组成立体导排网络,通过控制水力梯度定向疏导地下水,并设置反滤层防止细颗粒流失,实现地下结构周边水位持续低于基底,保持地下结构干燥。

4) 环境监测:在地下结构的关键受力部位预埋

$\text{Cl}^-$  传感器和腐蚀电位计,实现对地下结构腐蚀状态的长期自动化监测,为地下结构耐久性评估提供数据支撑。

通过协同设计,使不同防腐措施优势互补、协同作用。在施工过程中提高施工质量,在基面处理、关键工艺参数控制和质量验收等方面加强管理。在建筑使用阶段加强维护管理,每 5~10 年进行全面检测,采用环氧树脂压力注浆进行裂缝修补或更换失效阳极。通过协同设计、施工质量控制及全生命周期维护,提升沙漠地区地下结构在腐蚀环境中的耐久性。

5 地下结构的防水防腐设计方法

沙漠地区地下结构是否需要防水,取决于地下水上升风险与腐蚀环境等级的耦合作用。在建筑设计使用年限内,沙漠地区地下工程防水设计需遵循 2 个核心控制参数,即基础底面至隔水层顶面的垂直距离  $D$ 、设计使用年限内地下水位上升高度  $H$ 。当  $H < D$  时,即  $H = \sum v_i t_i < D$  时,采用结构自防水设计,可不采取主动防水措施;当  $H \geq D$  时,即  $H = \sum v_i t_i \geq D$  时,在结构自防水的基础上,需采取主动防水措施,并根据地下水到达基础底面的时间  $t$  对地下工程防水使用环境进行分类,如表 1 所示,根据工程防水使用环境类别采取差异化防水与防腐的协同设计方案。根据工程防水等级和防水使用环境类别确定工程防水做法,根据防腐等级确定防腐做法,具体措施可参照 GB 55030—2022《建筑与市政工程防水通用规范》与 GB/T 50046—2018《工业建筑防腐蚀设计标准》进行专项设计。

表 1 地下工程防水使用环境类别

Table 1 Classification of environmental categories for underground engineering waterproofing	
防水使用环境类别	地下水到达基础底面时间 $T/\text{年}$
I	$T \leq 20$
II	$20 < T \leq 40$
III	$T > 40$

沙漠地区地下水上升引发的问题不仅是地下结构的防水和防腐问题,地下水位上升还会产生地下结构抗浮和底板抗水压力等结构问题,需全面考虑地下水位上升引起的设计调整 and 成本增加,选择最优的防水防腐设计策略,保障结构安全和耐久性,并有效降低成本。

6 工程应用

埃及新首都 CBD 项目位于开罗以东,规划建设 20 栋超高层建筑,如图 1 所示。采用的地下结构方案如下:8 栋办公建筑和 5 栋住宅楼均为 2 层地下

室,地下室采用桩筏基础,办公建筑筏板底标高为 313.000m,住宅楼筏板底标高为 312.000m;超高层标志塔有 3 层地下室,采用筏板基础,筏板底标高为 299.000m,筏板厚度 5m,直接嵌入玄武岩持力层,筏板底面与玄武岩表面设置 0.25m 厚 C25 抗渗混凝土垫层;中区酒店 2 层地下室,采用桩筏基础,筏板底标高为 305.000m。



图 1 CBD 设计效果  
Fig. 1 CBD design effect

在开罗地区,因尼罗河泛滥形成大量黏土层,黏土层因其颗粒细腻而具有良好的隔水性能。地质勘察表明,CBD 项目场区存在双层复合隔水系统,如图 2 所示:上层为细黏土层(厚度为 6.5~12.5m),天然含水量 28%~32%,渗透系数  $k=0.9\times 10^{-7}\text{cm/s}$ ;下层为中风化玄武岩(厚度 28~43m),渗透系数  $k=3.5\times 10^{-8}\text{cm/s}$ 。细黏土层之上为地表砂土层,黏土层和玄武岩层间为含粗砂和细砂的多种砂层,玄武岩层之下为粗砂层和砂岩夹层等。这种“黏土+玄武岩”的复合隔水构造具有良好的隔水性能,有效阻隔了绿化灌溉水的进一步下渗。

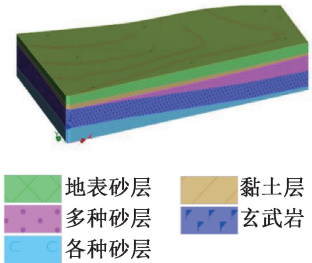


图 2 CBD 地质三维示意  
Fig. 2 3D geological schematic diagram of CBD

CBD 项目的土壤化学分析数据显示,CBD 项目区表层土壤中  $\text{Cl}^-$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  的质量浓度分别达到 2 230mg/kg 和 710mg/kg。根据 EN 206-1(2013)标准,当  $\text{SO}_4^{2-}$  含量  $>600\text{mg/kg}$  时,该环境被划分为 XA2(中等硫酸盐侵蚀等级)。参照 GB 50021—2001《岩土工程勘察规范》(2009 年版)的腐蚀性评价标准,CBD 项目地下水的腐蚀性等级判定为中等腐蚀环境。

在 CBD 项目中,开罗地区年降雨量  $<50\text{mm}$ ,其对地下水补给的影响微乎其微,暂不予考虑。CBD

区域内绿化灌溉用水量大,是该区域地下水的主要补给来源。CBD 区域周边环境环绕着灌溉水量庞大的绿廊,整体上与 CBD 区域保持水量平衡,且本研究重点聚焦 CBD 区域内部,暂不考虑绿廊灌溉水对 CBD 区域地下水的潜在影响,仅针对 CBD 区域内的绿化灌溉用水展开分析。CBD 市政设计给定的灌溉水量为  $750\text{m}^3/\text{d}$ ,年灌溉用水量  $273\,750\text{m}^3$ 。CBD 区域的灌溉系统由全封闭式灌溉系统与开放式灌溉系统两部分构成,其中封闭式灌溉占比 43%,开放式灌溉占比 57%,不考虑封闭式灌溉系统的下渗,并扣除由植物吸收或蒸发的灌溉水量,砂土的下渗比例取为 25%,则 CBD 区域渗入地下的年补水量为  $273\,750\times 0.57\times 0.25=95\,183\text{m}^3$ 。

现场测得砂土密度约为  $1.70\text{g}/\text{cm}^3$ ,颗粒密度为  $2.65\text{g}/\text{cm}^3$ ,计算得到砂土的孔隙率为 36%,砂土的饱和体积含水率取 36%。基于公式计算的地下水上升高度,在  $T=0.31$  年时地下水达到 299.000m 高程,即标志塔主楼筏板底出现地下水;在  $T=6.50$  年时地下水达到 305.200m 高程,即中区酒店筏板底出现地下水;在  $T=18.51$  年时地下水达到 312.000m 高程,5 栋住宅楼筏板底出现地下水;在  $T=20.16$  年时地下水达到 313.000m 高程,8 栋办公建筑筏板底出现地下水,办公建筑中的 2 栋由于隔水层位置较高,筏板底直接接触黏土隔水层,所以在投入使用后即会在筏板底出现地下水。由于隔水层的起伏,越接近地表,砂土层的面积越大,地下水位上升速度呈现先快后慢趋势,CBD 区域内地下水上升速度在初期为  $1.0\text{m}/\text{年}$ ,在接近表面时上升速度为  $0.61\text{m}/\text{年}$ 。CBD 区域室外的设计高程为 322.000m,按上述水位上升速度估算,在  $T=34.91$  年时 CBD 区域地下水位上升可达地表。

考虑到设计使用年限内 CBD 区域的地下水位,35 万  $\text{m}^2$  的地下结构部分均需设置防水层,且 CBD 区域的地下室底板的设计高程为 312.000m,与室外地面高差达 10m,由于地下水上升,需考虑裙房地下结构的抗浮设计和底板的抗水压力分析。裙房需增加抗拔桩,底板需增加厚度并配置双层双向受力筋以抵抗水浮力,采取上述措施导致的成本较高。为了有效降低造价,采取降低地下水位的设计思路,采取设置疏水层的设计措施,疏水层设计如图 3 所示。在基础之上 300~600mm 处设置疏水层,疏水层采用级配碎石,并用土工布与回填土隔离,避免砂土进入并堵塞疏水层。疏水层内设置排水管,将地下水引流到集水井,并通过潜污泵排到室外统一处理和利用。利用疏水层的构造措施将地下水的上

升高度控制在底板以下,防水措施无须在地下结构全高设置,基础和地下室的防水措施只做到地下室底板标高位置,底板可不作防水处理。另外,疏水层降低地下水位,不仅可取消地下结构的抗浮措施,底板也可做成 100mm 厚单层双向构造配筋板。

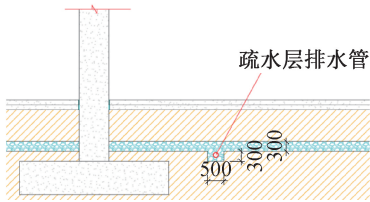


图 3 疏水层设计  
Fig. 3 Design of hydrophobic layer

CBD 项目的工程防水等级为一级,同时根据表 1 判断 CBD 项目的防水使用环境类别为 I 类,工程防水做法为 F1,采用回填土 1 道、结构自防水 1 道、防水涂料 1 道、防水卷材 2 道,在地下结构外侧采用红土回填。为提高结构自防水性能,在地下结构的混凝土配合比中添加硅灰,提高混凝土自防水性能和耐久性,同时将地下结构的保护层厚度提高至 50mm,裂缝控制宽度 $<0.15\text{mm}$ 。1 道涂料防水采用水泥基渗透结晶型防水涂料。2 道卷材防水做法分别是 SBS 改性沥青防水卷材和塑料防水板,两者形成“刚柔并济”防水体系,是针对沙漠地区大温差、地下水高腐蚀性 & 绿化根系威胁的特点设计。SBS 改性沥青防水卷材采用热熔法施工,其核心作用是提供优异的延展性、自愈性和黏结密封性能,能有效适应结构变形和封堵基层毛细孔及细微裂缝。但 SBS 改性沥青防水卷材在沙漠强紫外线、高温差、高腐蚀性地下水及潜在的施工损伤环境下,耐久性面临挑战。塑料防水板提供刚性防护层,采用空铺法或机械固定法铺设,接缝采用热熔焊接,其核心作用是提供物理屏障、耐候性、耐化学腐蚀性、耐根穿刺性和抗施工损伤能力。塑料防水板可承受回填过程中砂土和碎石的挤压及施工中可能的冲击;环境适应性强,耐高温,适应沙漠地区的昼夜大温差;化学稳定性强,耐化学腐蚀,对氯盐、硫酸盐有优异的抗腐蚀能力,可隔绝地下水中的腐蚀离子;塑料防水板作为防水外层,可有效阻隔绿化区域植物的根系穿刺。上述复合防水系统是针对沙漠极端环境和重要建筑严苛要求而设计的强化方案,刚柔性防水优势互补,显著提升了防水系统的整体可靠性和长期服役性能,降低单一材料失效导致系统整体失效的风险。

对于沙漠地区地下结构的防腐要求,结合腐蚀

性评价结果(XA2 环境等级),CBD 区域所有地下结构按 XA2 或中等腐蚀性等级考虑,采用 2 道冷涂沥青涂层对结构进行防腐蚀处理,沥青涂层干膜厚度 $>500\mu\text{m}$ 。

7 结语

对沙漠地区由于人类活动而导致的地下水位变化进行分析,研究了沙漠地区地下水上升机理和防水设计方法。首先需通过地质勘察等方法确定沙漠地区的地质构造中是否存在隔水层,并确定隔水层的连续性、厚度和抗渗性能是否符合要求。其次是综合分析地表水集聚速度,利用地下水集聚计算模型预测建筑设计使用年限内地下水的水位变化,确定相应的防水设计方法。先根据地下水位上升到地下结构的时间确定防水使用环境类别,再根据防水工程等级确定防水等级,然后根据工程防水等级和防水使用环境类别确定工程防水做法。分析土壤的化学分析报告,确定地下水上升后的腐蚀环境类别,对地下结构进行相应的防腐蚀处理,确保在建筑物设计使用期限内地下结构的安全性和耐久性。最后以埃及新首都 CBD 项目为工程应用案例,分析隔水层的分布和地下水补给来源,并计算地下水的上升速度、提出相应的防水防腐设计方法,为解决沙漠地区地下水上升引发的地下结构问题提供了参考。

参考文献:

[ 1 ] SMITH J. Corrosion mechanisms in desert environments [ J ]. Construction materials, 2021, 174(3): 45-58.

[ 2 ] 李明,张伟,王涛. 陆相细粒沉积岩成因与环境响应 [ M ]. 北京:地质出版社, 2018.

LI M, ZHANG W, WANG T. Genetic mechanism and environmental response of continental fine-grained sedimentary rocks [ M ]. Beijing: Geological Press, 2018.

[ 3 ] 刘增辉,刘大猛,张宏飞,等. 沉积岩储层孔隙度下限研究进展 [ J ]. 地质科技情报, 2010, 29(2): 103-109.

LIU Z H, LIU D M, ZHANG H F, et al. Research progress on the lower limit of porosity in sedimentary rock reservoirs [ J ]. Geological science and technology Information, 2010, 29(2): 103-109.

[ 4 ] ZHANG H, LI J, XIE X, et al. Effects of freezing-thawing on the permeability of silty clay [ J ]. Cold regions science and technology, 2015, 114: 22-27.

[ 5 ] DONG Q G, ZHOU W B, ZHANG Y. Effects of irrigation on groundwater recharge under deep buried depth condition [ C ] // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 94 (2017), 2017.

[ 6 ] AL-SITTAWY M, GAD S, FOUAD R, et al. Assessment of soil subsidence due to long-term dewatering Esna City, Egypt [ J ]. Water science, 2019, 33(1): 40-53.