

# Research on the Engineering Design of Seasonal Thermal Storage Ponds in Northern Regions

Bei Su Jinhang Yin

Bohai Co., Ltd. of China Water Resources and Hydropower Consulting, Tianjin, 300202, China

## Abstract

The project site has a cold winter climate and abundant solar radiation resources in summer. The solar energy flow is unstable, and the winter and summer loads are unbalanced, which hinders the wide application of solar energy. The construction of seasonal thermal storage ponds, using water as the thermal storage medium, is conducive to promoting the revolution in energy production and consumption, building a clean, low-carbon, safe and efficient modern energy system, and providing a reference for the construction of renewable energy. The construction of the project can effectively improve the local energy structure and ecological environment, greatly enhance the utilization efficiency of renewable energy, optimize the energy structure, and effectively improve the ecological environment of the region. The designed water capacity of the seasonal thermal storage pond is 60,000 m<sup>3</sup>. Through solar thermal collection technology and thermal storage technology, solar energy resources are fully utilized to achieve cross-seasonal utilization of solar energy.

## Keywords

Thermal storage pond design; Geomembrane anti-seepage; Seepage calculation; Stability analysis

## 北方地区跨季节储热池工程设计研究

苏贝 尹津航

中国水利水电建设工程咨询渤海有限公司, 中国·天津 300202

## 摘要

该项目场址冬季气候寒冷, 夏季具有丰富的太阳能辐射资源, 太阳能能流不稳定, 冬夏负荷不平衡, 阻碍了太阳能的广泛运用。建设跨季节储热池, 以水作为储热介质, 有利于推进能源生产和消费革命, 构建清洁低碳、安全高效的现代能源体系, 为可再生能源的建成提供参考; 项目的建设有力改善当地的能源结构和生态环境, 大幅提升可再生能源的利用效率, 优化能源结构, 可有效改善地区的生态环境。项目设计跨季节储热水体水容量为6万m<sup>3</sup>, 通过太阳能集热技术和储热技术, 充分利用太阳能资源, 实现太阳能的跨季节利用。

## 关键词

储热池设计; 土工膜防渗; 渗流计算; 稳定分析

## 1 工程区地质条件

### 1.1 地形地貌

工程区属黄土塬地貌单元, 受流水冲刷作用, 冲沟发育, 地形起伏较大, 北高南低, 地面高程介于 678~695m 之间, 为储热池选址及布置提供了自然地形基础。

### 1.2 地层岩性

工程区地表均被第四系地层覆盖, 地表出露与钻探揭露的地层主要由第四系沉积层组成, 地层岩性以杂填土和粉土为主。现自上而下分述如下:

第①层: 杂填土 (Q<sub>4</sub><sup>m</sup>)

灰褐色, 松散, 稍湿, 主要由粉土、粉细砂构成, 植物根系发育, 含少量碎石及生活垃圾。该层底板埋深

0.3~4.3m, 层厚 0.3~4.3m。

第②层: 粉土 (Q<sub>4</sub><sup>1</sup>)

黄褐色, 稍密, 湿, 切面粗糙, 摇振反应迅速, 干强度低, 韧性低, 孔隙发育, 土质均匀。该层底板埋深 6.7~13.4m, 层厚 6.2~12.7m。该层进行标准贯入试验 114 组, 修正击数 5.5~8.1 击, 平均值 6.8 击。

第③层: 粉土 (Q<sub>3</sub>)

黄褐色, 中密, 湿, 切面粗糙, 摇振反应迅速, 干强度低, 韧性低, 土质均匀致密。该层在勘察深度内未被揭穿, 最大揭露厚度 10.4m。该层进行标准贯入试验 110 组, 修正击数 7.3~11.9 击, 平均值 9.3 击。

工程区岩土物理力学性质指标建议值见表 1。

表1 工程区物理力学性质指标建议值表

层号	岩土名称	承载力特征值 Fak/kPa	凝聚力 C <sub>k</sub> /kPa	内摩擦角 Φ <sub>k</sub> /度	压缩模量 E <sub>s</sub> /MPa
②	粉土	130	24.3	16.8	5.0
③	粉土	160	27.5	18.0	6.3

### 1.3 水文地质条件

勘察深度内(最大钻孔深度20.0m)未发现地下水。根据场地南侧约4000m处水井资料,地下水位埋深22.0m,地下水位标高623.6m(1993年4月历史最高水位),属孔隙潜水,补给来源为大气降水,排泄方向沿地势向东北,水位年最大变幅2.0m。由于最高地下水位远离储热池基础,设计时可不考虑地下水对建筑物的影响。

### 1.4 地震效应评价

#### (1) 场地类别

根据区域地质条件,场地地面下20.0m范围内等效剪切波速168.8m/s~169.2m/s,场地覆盖层厚度大于50.0m,依据《建筑抗震设计规范》(GB50011-2010)(2016年版),建筑场地类别为Ⅲ类,中软土,特征周期值为0.55s。

#### (2) 地震动参数

根据《中国地震动参数区划图》(GB18306—2015)附录C.2,工程区属Ⅲ类场地,其50年超越概率10%的基本地震动峰值加速度值为0.20g,基本地震动加速度反应谱特征周期为0.55s。相应地震基本烈度为Ⅷ度。

#### (3) 地震液化

该场地在钻探深度内未见地下水(最大勘探深度20m),该场地地基土在钻探揭露深度范围内不存在饱和粉土及饱和砂土,设计时可不考虑地基土的液化问题。

## 2 工程布置研究

### 2.1 工程等别和建筑物级别

储热池蓄水容量6万m<sup>3</sup>,按照《水利水电工程等级划分及洪水标准》(SL252-2017)表3.0.1规定,蓄水工程规模为小(2)型,工程等别确定为V等,主要建筑物及次要建筑物级别均为5级。

### 2.2 抗震设防烈度

根据《建筑抗震设计规范》(GB50011-2010)(2016年版)规定,场地抗震设防烈度为8度(第二组),设计基本地震加速度0.20g,拟建建筑物抗震设防类别为丙类,场地为可进行建设的一般场地。

### 2.3 工程合理使用年限及耐久性

本工程储热池设计使用寿命50年。

根据《水工混凝土结构设计规范》(SL191-2008),钢筋混凝土基本组合承载力安全系数K=1.15,偶然组合K=1.00。

场地的地下水位埋藏较深(大于20.0m),故设计时可不考虑地下水对建筑材料的腐蚀性。

勘察区场地无盐渍土分布,未受工业污染,但场地土对建筑材料具微腐蚀性。根据《水利水电工程合理使用年

限及耐久性设计规范》(SL654-2014)本工程所处的侵蚀环境类别为三类,确定本工程混凝土保护层最小厚度:板、墙30mm,梁、柱、墩45mm。钢筋混凝土构件表面最大裂缝宽度限值为0.25mm。混凝土抗渗等级W8、抗冻等级F250。

### 2.4 方案比选

#### 2.4.1 方案类型

本工程设计结合工程区地势起伏较大的特点,利用现有旱沟,将储热池布置方案分为单个储热池及紧凑布置多个储热池型式,结构类型分为钢筋混凝土储热池及挖填铺设土工膜储热池(简称土工膜储热池),共形成4个比选方案:

方案一:2×3万m<sup>3</sup>钢筋混凝土储热池;

方案二:6万m<sup>3</sup>钢筋混凝土储热池;

方案三:2×3万m<sup>3</sup>土工膜储热池;

方案四:6万m<sup>3</sup>土工膜储热池;

#### 2.4.2 方案造价对比

各方案投资造价见表2、表3:

表2 钢筋混凝土储热池方案投资造价表(单位:万元)

钢筋混凝土储热池方案	数量	单个造价	总价
3万m <sup>3</sup>	2	2348	4696
6万m <sup>3</sup>	1	3844	3844

表3 土工膜防渗储热池方案投资造价表(单位:万元)

土工膜防渗储热池方案	数量	单个造价	总价
3万m <sup>3</sup>	2	1226	2452
6万m <sup>3</sup>	1	1711	1711

#### 2.4.3 方案综合分析

钢筋混凝土储热池:防渗性能好、结构刚度大,但造价显著高于土工膜方案,且施工工艺复杂、周期长,对地形适应性较差,针对本工程地势起伏大的特点,需额外增加地基平整及结构适配成本。

土工膜储热池:造价仅为钢筋混凝土方案的30%~45%,施工灵活便捷,可充分利用现有旱沟地形,开挖料可直接用于填筑岸堤,实现土石方平衡,降低工程成本;同时土工膜防渗体系施工速度快,后期维护便捷,适合本项目储热池工程。

单个与多个储热池对比:单个6万m<sup>3</sup>储热池相较于2×3万m<sup>3</sup>组合方案,减少了分隔结构及防渗界面,降低了渗漏风险,且便于统一管理维护,空间利用率更高。

综合比较工程造价、施工适应性、防渗效果及维护成本等因素,确定6万m<sup>3</sup>土工膜防渗储热池为最优设计方案。

## 3 土工膜防渗储热池设计

储热池设计以土石方平衡为原则,充分利用开挖料填筑水池岸堤,平面设计为正方形,便于上部保温盖标准化

设计。

### 3.1 池体断面设计

(1) 设计基本参数: 池底尺寸  $36\text{m} \times 36\text{m}$ , 挡水侧边坡坡比 1:3, 背水侧边坡坡比 1:2.5, 上开口尺寸  $108\text{m} \times 108\text{m}$ ; 池顶高程 691m, 底高程 679m, 坝顶超高 1m, 蓄水位 690m; 池顶宽度 6m, 坝顶顶宽 8m, 池顶路面采用 20cm 厚砂砾石路面, 向下游侧倾斜 2%。

(2) 地基处理: 工程区地基不均匀且具湿陷性, 施工需避开雨季及冬季。采用换填垫层法处理地基, 将池体地基 2m 范围内土体按粉土: 水泥 = 9:1 掺拌换填, 换填部分需均匀密实, 压实度不小于 98%; 填筑前通过碾压试验确定施工参数, 分层碾压厚度不超过 300mm。

(3) 防渗体系: 换填后边坡及底面平整, 铺设 20cm 厚砂垫层, 其上依次铺设  $800\text{g}/\text{m}^2$  土工布、6mm 厚 HDPE 土工格栅, 最上层铺设 2.5mm 厚 HDPE 高温土工膜进行全池体防渗; 土工膜铺设完成后需及时遮盖保护, 避免阳光曝晒影响使用寿命。

4) 马道及排水: 坝体高程 685m 处设置 3m 宽马道; 马道至地面, 坝体背水侧外设贴坡排水, 边坡坡比 1:2.5, 排水结构从内向外依次为 40cm 厚中粗砂层、40cm 厚级配碎石层、40cm 厚干砌块石层。

### 3.2 填筑标准

1) 填料要求: 优先使用开挖料填筑, 填料水溶盐含量不大于 3%, 有机质含量不大于 4%; 开挖料粉土回填时需破坏原状结构, 压实后消除湿陷性; 填筑土料含水量按最优含水量控制, 偏差不得超过  $\pm 3\%$ , 压实后渗透系数不大于  $1 \times 10^{-5}\text{cm}/\text{s}$ 。

2) 压实标准: 填筑土料压实度不小于 98%, 砂料填筑相对密度不低于 0.70, 级配碎石层要求级配连续, 平整区填筑压实度不小于 94%。

3) 施工要求: 所有区域在填筑前应清除表层杂填土、有机土、乱石或其它废料, 并将清理后的基础压实。施工填筑从低处向高分层碾压, 均匀密实碾压, 施工中需做好过程控制及分层质量检查, 机械无法达到的区域用人工夯实。

### 3.3 坝内排水排气

(1) 盲沟设计: 换填垫层中开挖宽 50cm、高 30cm 的排水排气盲沟, 内铺 DN120 镀锌钢管, 管壁上部打孔 (孔径 5mm, 开孔率 0.15%), 钢管表面包土工布, 周围填充 0.5mm~20mm 洗净碎石, 碎石外包两层土工布, 上部铺设砂垫层整平; 土工布与钢管交叉处用尼龙绳绑扎牢固, 钢管穿过坝体将渗水排至坡脚排水沟, 坡降  $i=0.02$ 。

(2) 排水沟布置: 储热池开挖及回填边坡坡脚与马道内侧设置矩形浆砌石排水沟, 壁厚 30cm, 断面尺寸  $100\text{cm} \times 60\text{cm}$ ; 贴坡排水外侧坡脚设置梯形浆砌石排水沟, 底宽 1.0m, 深 0.8m, 边坡 1:1, 壁厚 30cm, 汇集坝面所有水流后排至下游天然沟谷。

## 4 渗流及稳定计算

### 4.1 计算软件与模型

采用 GEOSTUDIO 软件进行平面有限元渗流数值分析, 计算模型选取池体填筑典型断面, 包含池体底部及内外基础, 基础边界长度 203m, 底部边界距池顶 36m; 模型网格对防渗体系进行细化处理, 池顶高程 691.00m, 节点总数 801 个, 单元总数 724 个。

计算参数选取依据地质勘察报告及相关规范, 地基土及填筑料渗透系数、抗剪强度指标均采用实测建议值, 土工膜渗透系数按  $1 \times 10^{-11}\text{cm}/\text{s}$  取值, 模型见图 1:

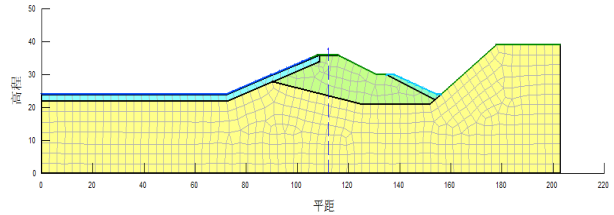


图 1 储热池坝体计算模型

### 4.2 渗流稳定计算及结果

(1) 计算工况: 结合工程实际情况综合分析, 渗流计算的工况分为: ①土工膜完整情况; ②土工膜局部破损情况; ③土工膜完全破损情况, 池体渗流计算结果见图 2~4:

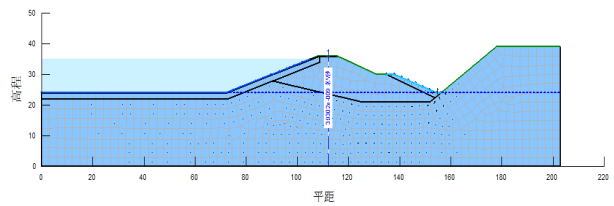


图 2 工况①池体渗流计算结果图

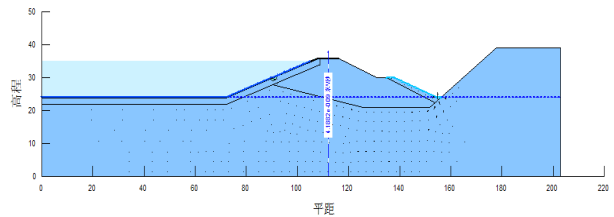


图 3 工况②池体渗流计算结果图

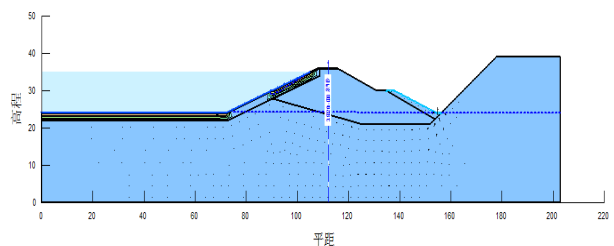


图 4 工况③池体渗流计算结果图

(2) 计算结果: 由渗流计算成果得到各工况渗漏量:

表5 各计算工况单宽渗漏量

工况	单宽渗漏量 $m^3/s$	填筑断面渗漏量 $m^3/s$	年渗漏量 $m^3$
①	$3.94 \times 10^{-09}$	$3.55 \times 10^{-07}$	11.3
②	$4.20 \times 10^{-09}$	$3.78 \times 10^{-07}$	12.1
③	$3.91 \times 10^{-08}$	$3.52 \times 10^{-06}$	110.7

## (3) 结果分析:

①土工膜完整时,年渗漏量仅  $11.15m^3$ , 渗漏损失极小, 防渗体系效果显著; ②土工膜局部破损时, 渗漏量略有增加, 但仍处于较低水平; ③即使土工膜完全破损, 年渗漏量  $110.69m^3$ , 相对于  $6万 m^3$  总蓄水量, 渗漏率仅  $0.18\%$ , 且地基换填层及排水系统可有效控制渗流场分布, 不会产生集中渗流导致坝体失稳。

## 4.3 池体稳定计算

## (1) 计算方法与工况

采用圆弧滑动法进行稳定分析, 基于刚体极限平衡理论, 计算工况与渗流计算一致, 即土工膜完整、局部破损、完全破损 3 种情况, 安全系数允许值按规范要求取 1.25。

## (2) 计算结果

池体填筑断面稳定分析成果见表 6, 相应的临界滑裂面位置见图计算成果见图 5~7。

表6 池体填筑断面稳定分析成果表

工况	安全系数	安全系数允许值
①	1.729	1.25
②	1.726	1.25
③	1.724	1.25

由表可见, 池体在各种工况下的抗滑稳定安全系数均满足规范要求。

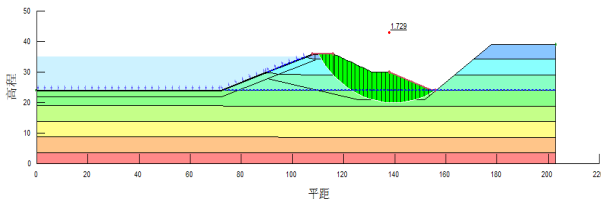


图5 工况①池体稳定计算结果图

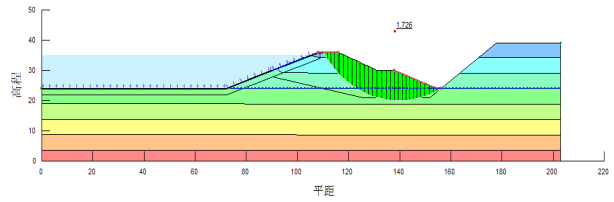


图6 工况②池体稳定计算结果图

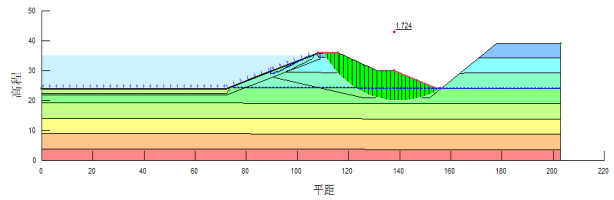


图7 工况③池体稳定计算结果图

(3) 结果分析; 各工况下池体抗滑稳定安全系数均在 1.72 以上, 高于规范允许值, 表明储热池边坡坡比、填筑标准及排水系统设计合理, 即使在土工膜破损导致渗流条件变化的情况下, 坝体仍具有良好的稳定性, 结构安全可靠。

## 5 结论

(1) 方案比选表明,  $6万 m^3$  土工膜防渗储热池在造价、施工适应性及维护成本等方面优势显著, 相较于钢筋混凝土方案可节省投资  $60\%$  以上, 且能充分利用地形实现土石方平衡, 为最优设计方案。

(2) 储热池设计参数合理, 地基处理、防渗体系、排水排气及保温层设计形成完整技术体系, HDPE 高温土工膜与复合排水结构结合, 有效控制了渗漏损失; 圆弧滑动法计算验证显示, 各工况下稳定安全系数均满足规范要求, 结构安全可靠。

(3) 本工程设计使用寿命 50 年, 可实现太阳能跨季节储存利用, 替代传统燃煤锅炉, 对北方地区优化能源结构、改善生态环境、促进新能源消纳具有重要意义, 其设计思路及技术方案可为类似工程提供参考。