

MD阵列水体保温设计

LHAASO_MD. 肖刚
云南大学合作组大会
2017. 1. 18

内容提要

- 1.MD水体保温必要性分析
- 2.羊八井MD水体保温实验分析
- 3.稻城MD保温实验验证
- 4.保温材料性能

1. MD水体保温必要性分析

保温必要性

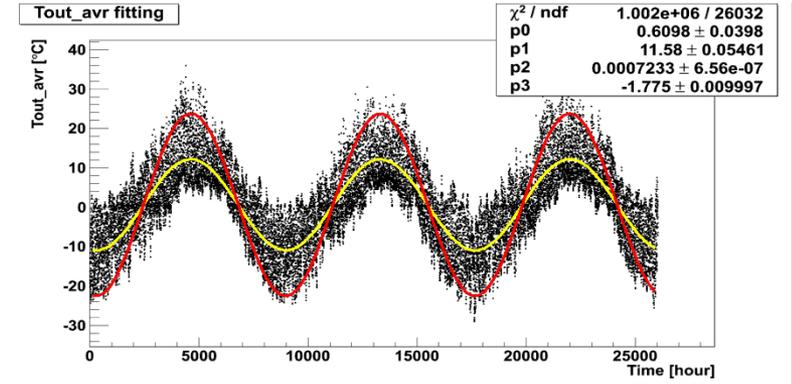
➤ MD单元探测介质为44吨纯水，水体结冰将造成探测器不可修复的损坏，影响探测器正常运行，情况严重将会导致实验失败。

运行环境特点

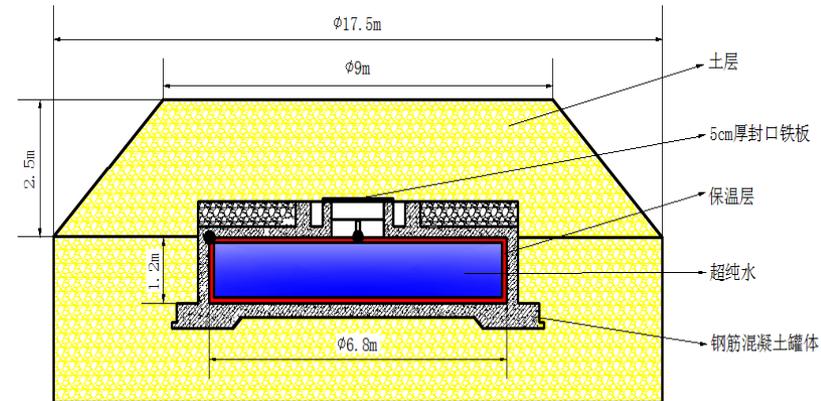
➤ 在海拔4400m的高原，平均冻深1.67m，年平均气温1.2℃，地下1.2m处平均温度4℃；

可行性分析

- 保温过程为“无源”的变化过程；
- MD顶部盖2.5m土，具有保温作用；
- 保温材料可增加水体随外界温度变化的延迟时间，并减小水温变化的幅度；



2010/01—2012/12羊八井气温变化



MD单元探测器

2. 羊八井水体保温分析

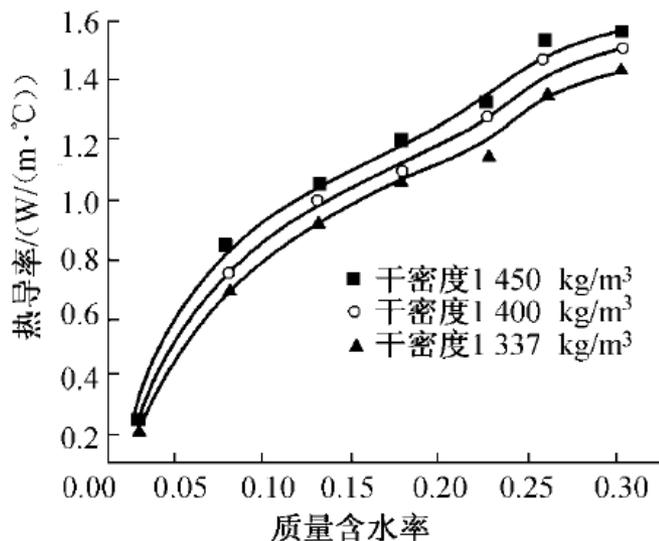
- 羊八井MD水体保温模拟
- 羊八井MD水温实测与模拟对比



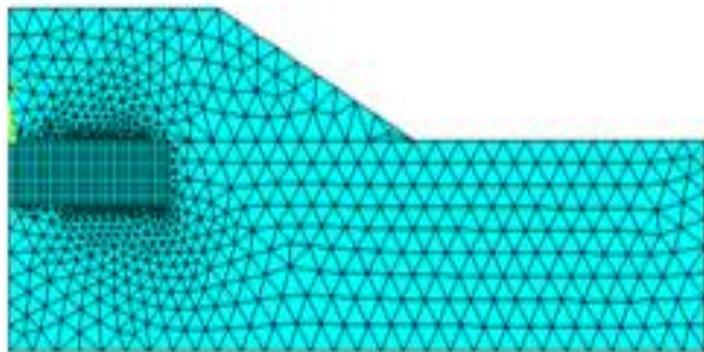
MD保温羊八井实地验证

羊八井MD保温模拟

仿真设置



| 材料 | 密度 (Kg/m3) | 热传导系数 W/(m*°C) | 比热 J/(Kg*°C) |
|----|------------|----------------|--------------|
| 水 | 996 | 0.599 | 4185 |
| 土壤 | 1450 | 0.4 | 840 |
| 空气 | 1.293 | 0.024 | 1000 |



按实际情况建模

- 1、初始温度设置：水温8°，土层15°，空气20°
- 2、加载温度函数（公式用公式编辑器写，然后粘到这个地方）

由实测值拟合得到：

地表温度：

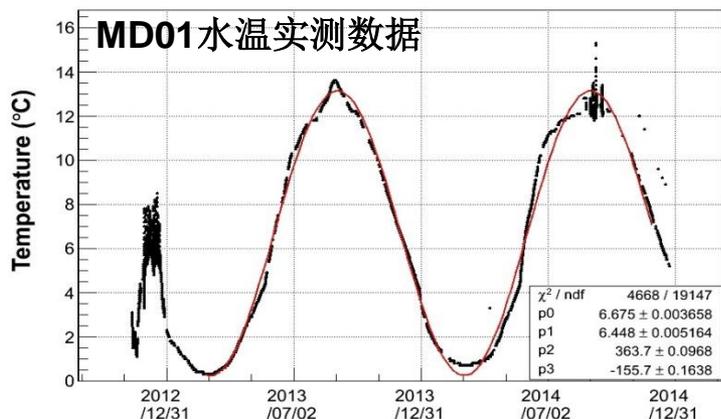
$$Y = 5.8 + 23 * \sin \left(2\pi / 365 - 93 \right)$$

地下 3.4米处温度：

$$Y = 6 + 7.35 * \sin \left(2\pi / 365 - 93 \right)$$

- 3、由于地面受太阳辐射等因素影响，按正温2°考虑

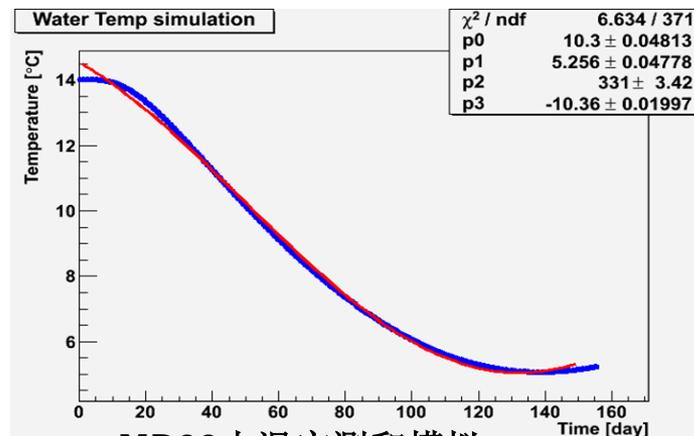
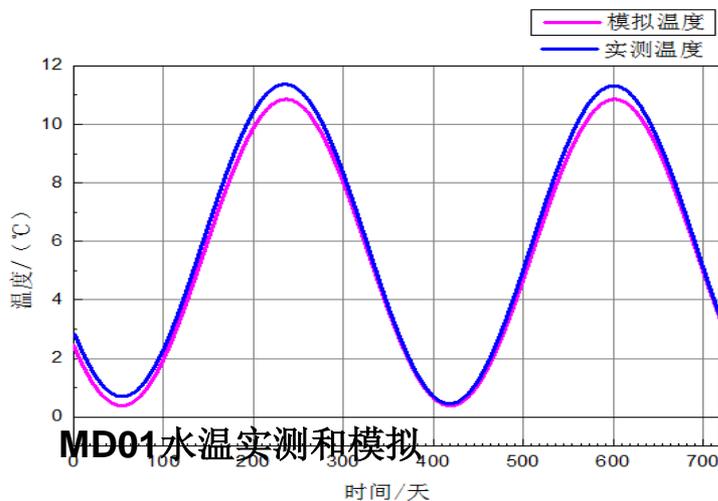
羊八井水温实测与模拟对比



MD01水温三年实测数据



MD02水温8个月实测数据



MD02水温实测和模拟

羊八井MD水体实测数据与仿真比对

羊八井水温实测与模拟对比

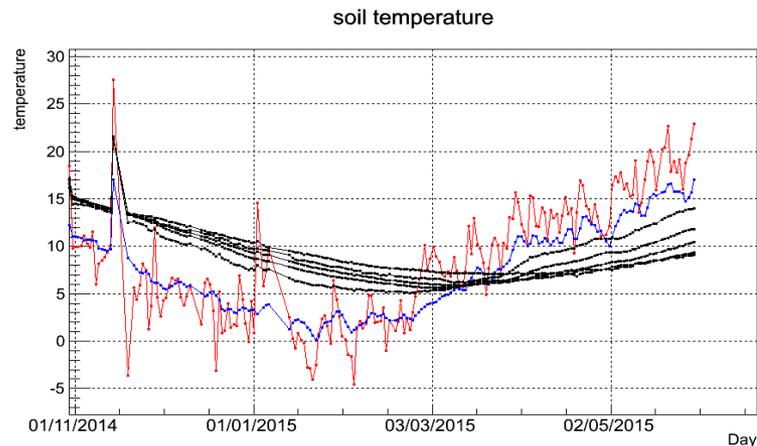
土壤温度测试

- 探测器周边土温梯度测试；
- 温度探头间隔0.6m；
- 红色距离地面0m，蓝色0.6m；

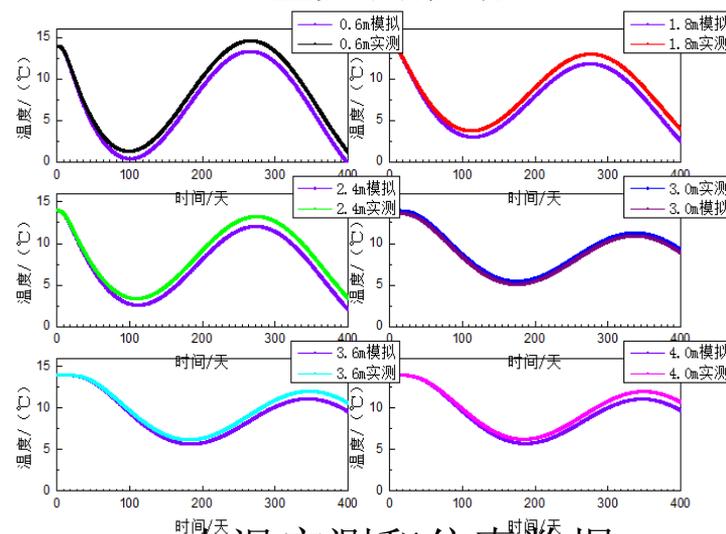
其余温度随深度略有升高，温度最高处为土壤下4.2m深；

土层梯度仿真和实测对比

- 趋势基本相同；
- 局部会有不一致性，误差约在1—2°C；
- 仿真的边界条件有些是查资料得到，与真实值有偏差，造成仿真的局部差别；



土温实测数据



土温实测和仿真数据

3. 稻城MD水体保温实验验证

- 稻城MD水体保温模拟
- 稻城罐体保温层厚度模拟
- 稻城MD保温层方案



深埋

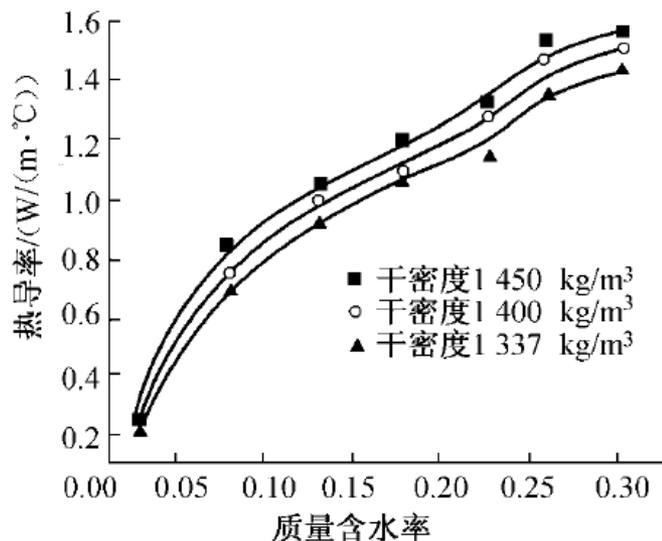


浅埋

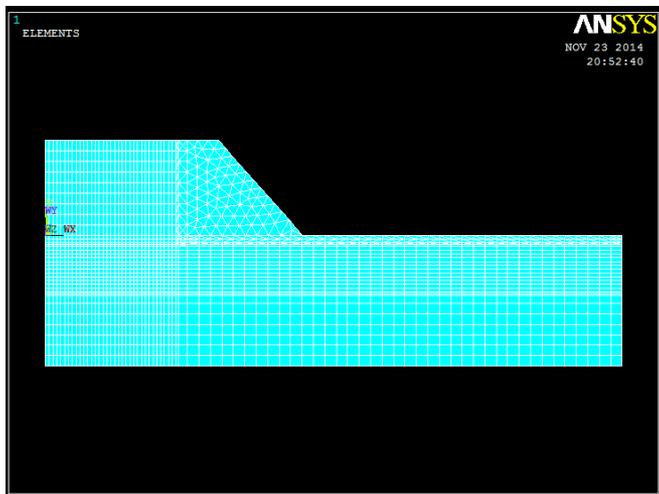


沼泽

稻城MD水体模拟



| 材料 | 密度 (Kg/m ³) | 热传导系数 W/(m*°C) | 比热 J/(Kg*°C) |
|-----|-------------------------|----------------|--------------|
| 水 | 996 | 0.599 | 4185 |
| 保温层 | 35 | 0.02 | 2475 |
| 土壤 | 1450 | 1.0 | 840 |
| 空气 | 1.293 | 0.024 | 1000 |



按实际情况建模

- 1、初始温度设置：水温8.5°，土层8.5°，空气-4°，保温层8.5°；
- 2、加载温度函数，由实测值拟合得到：

$$T(t) = 2.7 + 15.7 \sin\left[\frac{2\pi}{365}(t - 273)\right]$$
- 3、由于地面受太阳辐射等因素影响，按正温2°考虑，

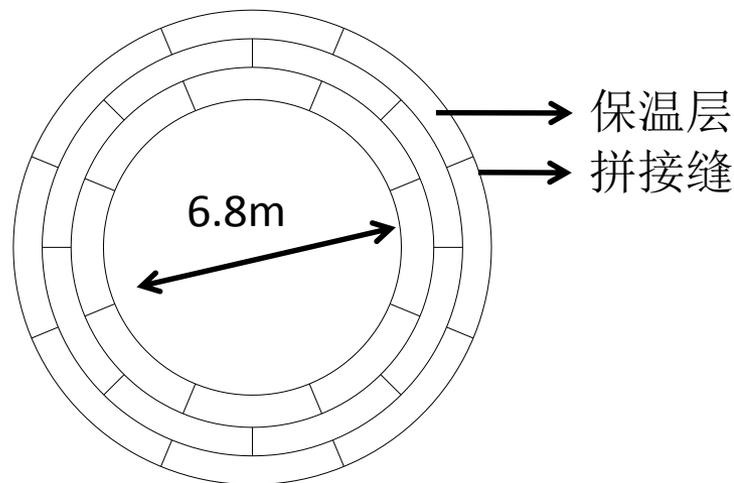
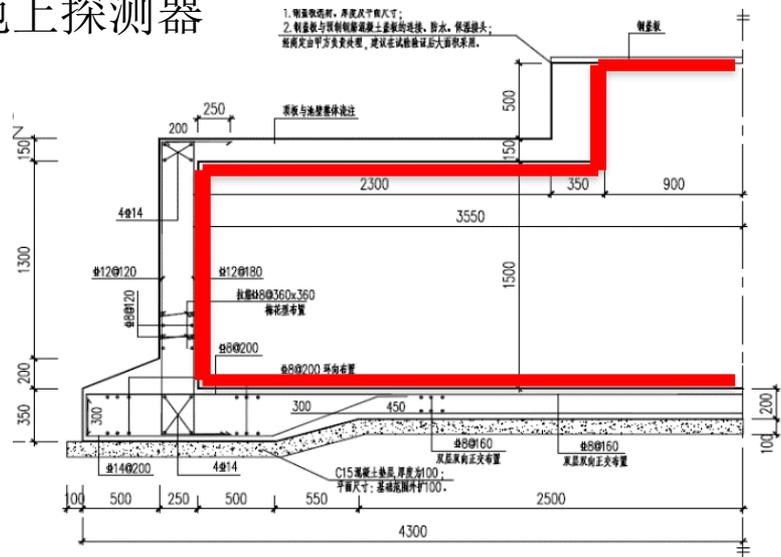
稻城MD保温层厚度模拟

| 探测器 | 保温层厚度 | 气温变化 | 含水率及对应水体温度 | | |
|--------|-------|---------|------------|------|------|
| | | | 1.0 | 0.8 | 0.6 |
| 垫高1m | 15cm | 正常气温 | 1.83 | 2.08 | 2.38 |
| | | 年平均降5°C | -0.19 | 0.03 | 0.34 |
| 地平面 | 15cm | 正常气温 | 2.06 | 2.28 | 2.6 |
| | | 年平均降5°C | 0.23 | 0.46 | 0.77 |
| 地下1.2m | 10cm | 正常气温 | 1.70 | 2.05 | 2.45 |
| | | 年平均降5°C | 0.22 | 0.55 | 0.95 |
| 地下2.2m | 10cm | 正常气温 | 1.90 | 2.25 | 2.62 |
| | | 年平均降5°C | 0.48 | 0.8 | 1.2 |
| 地下4m | 10cm | 正常气温 | 2.0 | 2.57 | 2.72 |
| | | 年平均降5°C | 0.73 | 1.06 | 1.46 |

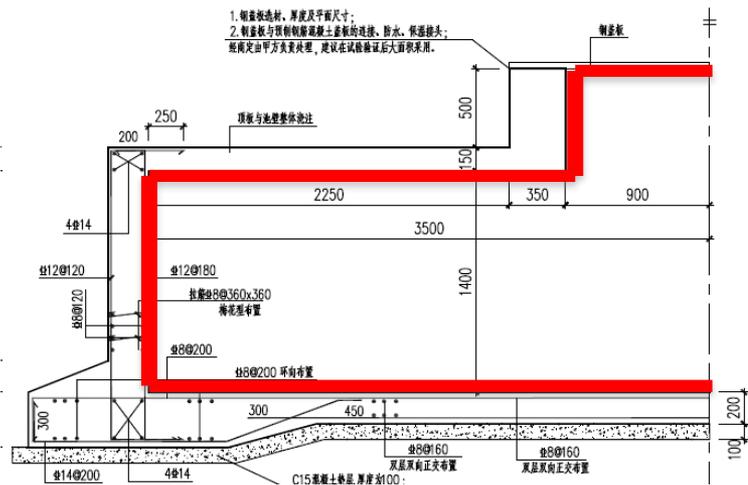
稻城MD不同埋深保温层厚度预测

稻城MD水体保温方案

地上探测器



地下及深埋探测器



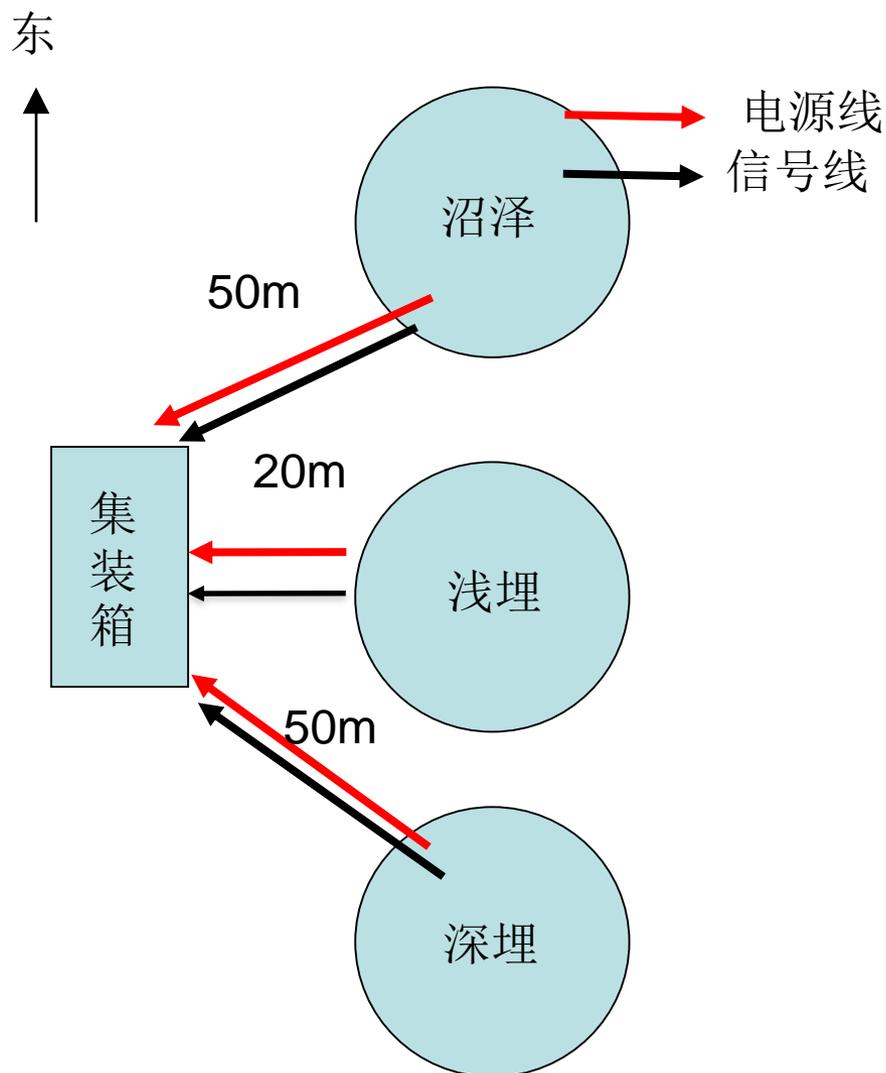
施工方式示意图

- 1、探测器分为地上、地下两种，地上用15cm保温层，地下用10cm保温层；
- 2、保温层设计为喷涂聚氨酯泡沫；实验采用聚苯乙烯泡沫板。两者导热系数几乎一样。

稻城水体保温实验

- 稻城2015年11月份安装探测器水温模拟
- 稻城保温方案验证总体布局
- 温度探头标定
- 水体温度测试方案
- 温度测试数据分析

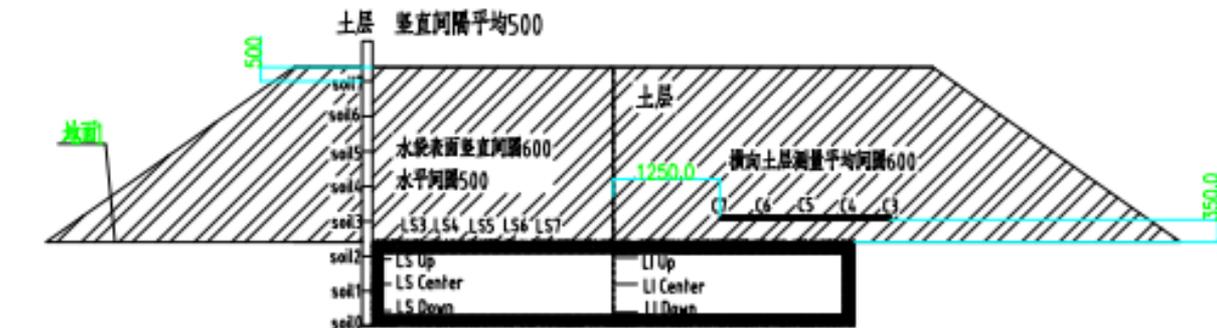
稻城保温实验总体布局



总体布局：

- 1、罐体基本为东西向排列，两个在台地，一个在灌木和河道斜坡附近；
- 2、集装箱作为操作间放置在中间探测器附近，供电和工控机等设备放在操作间内；
- 3、每个探测器有电源线和信号线连通到操作间，最大长度为50m；
- 4、每个探测器分别测试水温和罐体周边土壤深度的温度梯度，因此每个探测器有6根线缆引出；
- 5、线缆采用穿线管+深埋的方式加以保护；

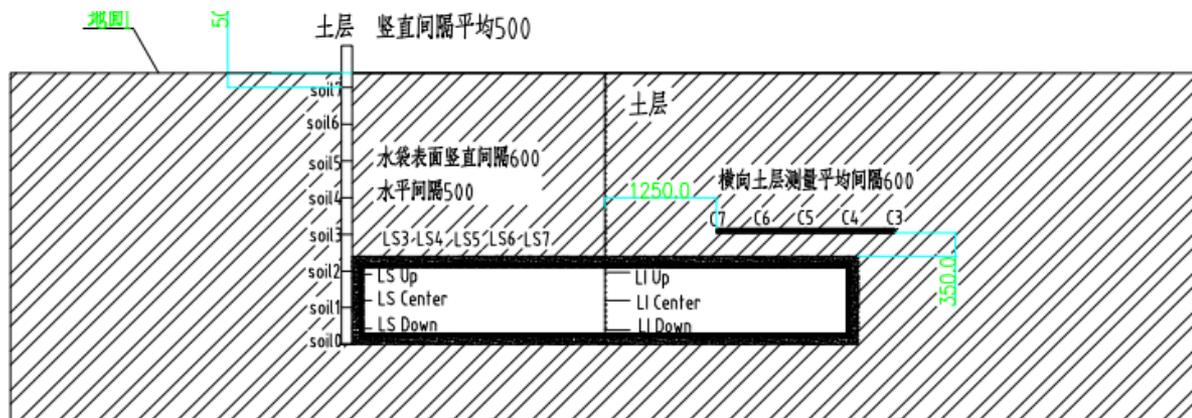
水体温度测试方案



浅埋水袋



沼泽水袋



深埋水袋

罐体位置

罐体位置分别为：

浅埋：水泥罐体上盖和地平面平齐；

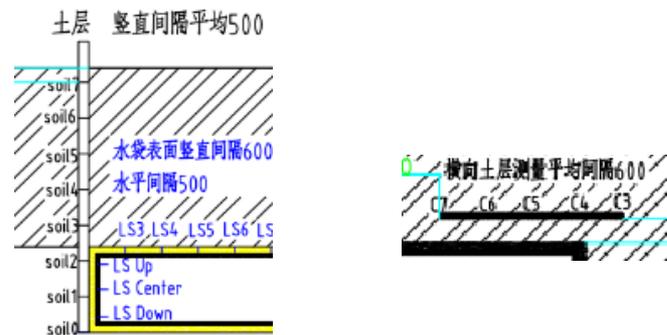
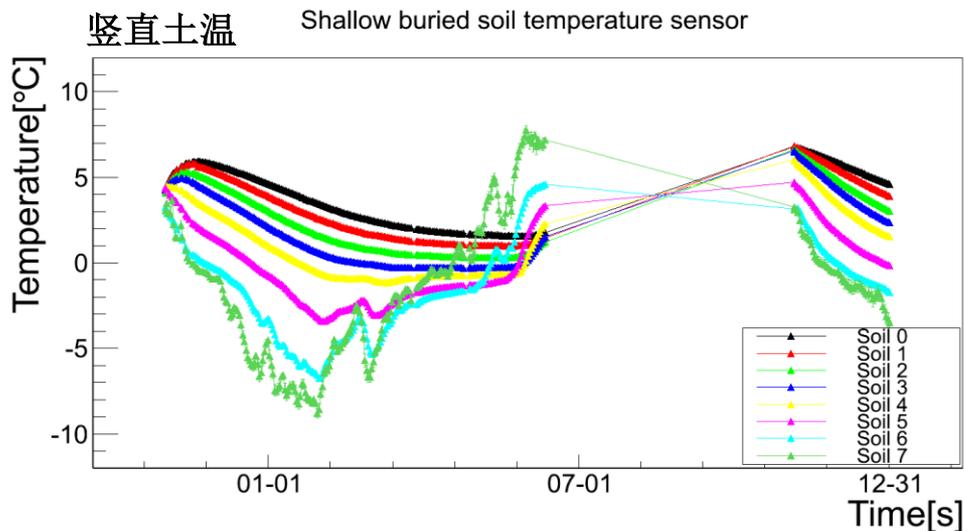
沼泽：水泥罐体下底和地平面平齐；

深埋：水泥罐体上盖距地平面2.5m；

温度探头布局

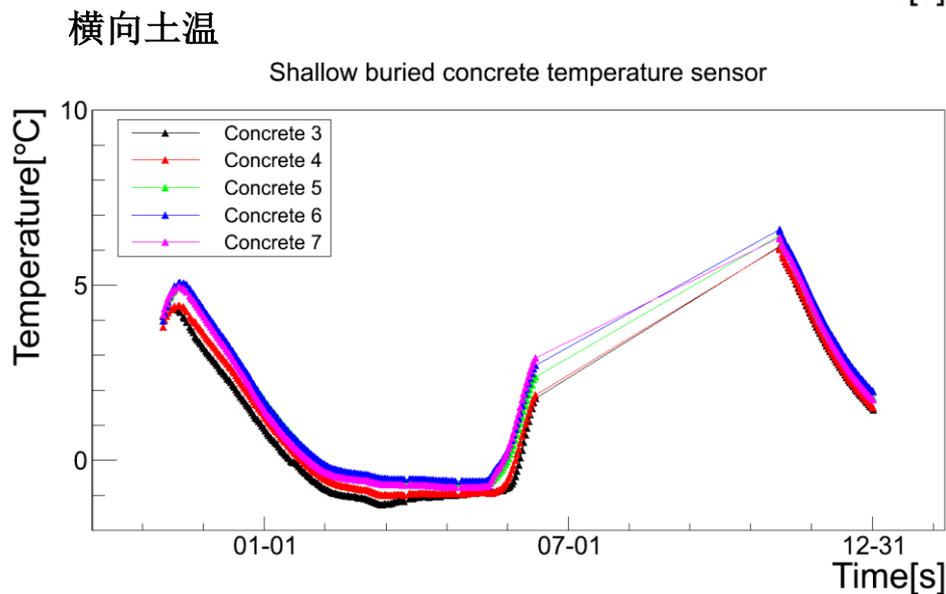
- 1、从罐体底部到土层顶部竖直方向温度测试；
- 2、罐体上方土层横向温度和罐内水体横向温度测试（保温层内外）；
- 3、1.2m罐体高度对应位置的罐体外、水体边界和水体中心温度测试；

浅埋水袋土温



竖直土温

横向土温

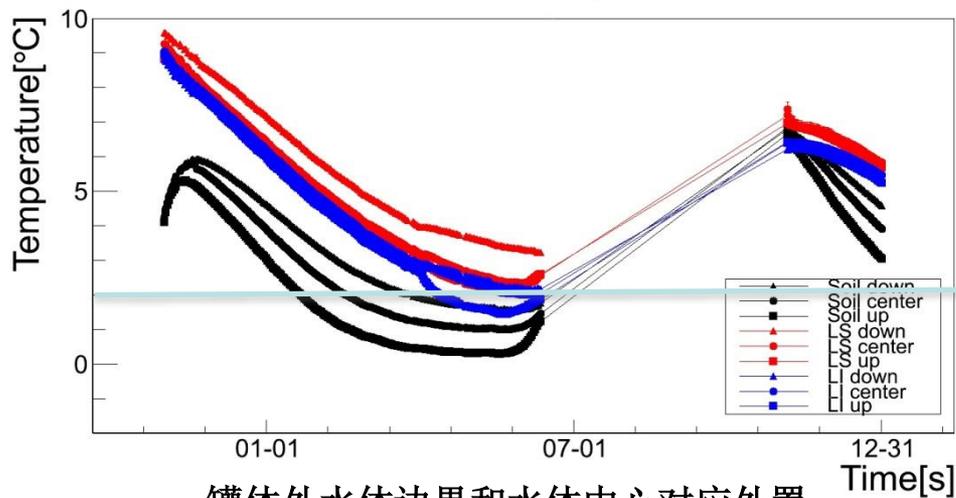


土层温度纵向形成梯度分布，随距离增加温度差距变小。温度趋于平衡。**Soil 7**接近地表，受天气变化等外界因素影响较大。

水泥罐体处温度横向梯度分布，外层温度最低，中心温度高

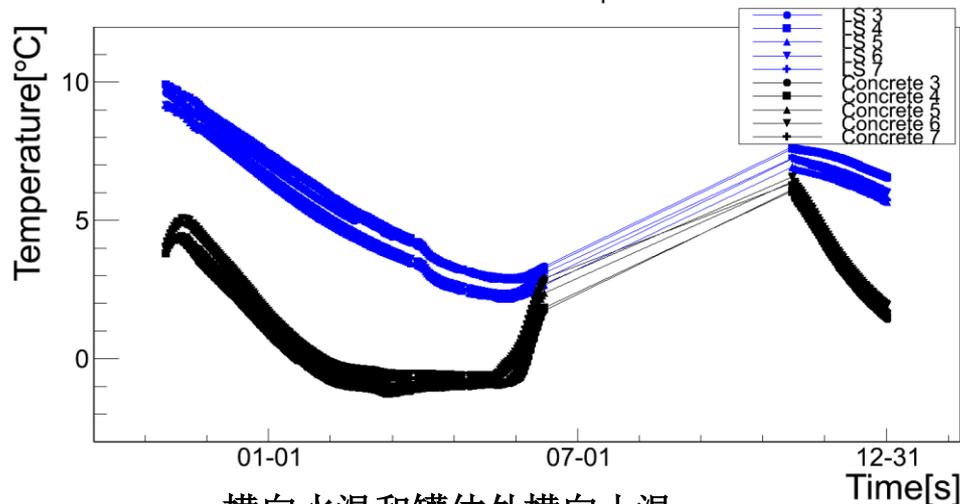
浅埋水袋水温与土温对比

Shallow buried Comparison



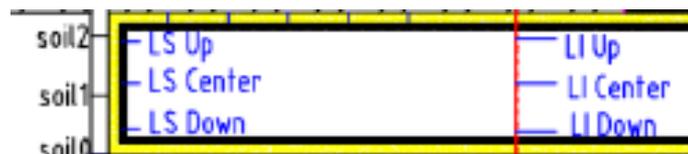
罐体外水体边界和水体中心对应外置

Shallow buried Comparison



横向水温和罐体外横向土温

模拟值最低2.08度



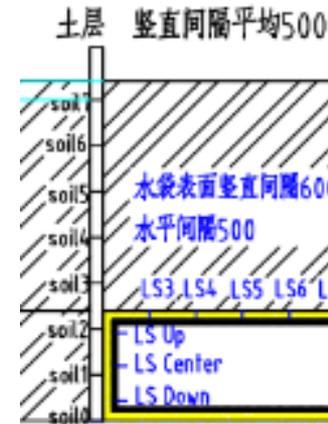
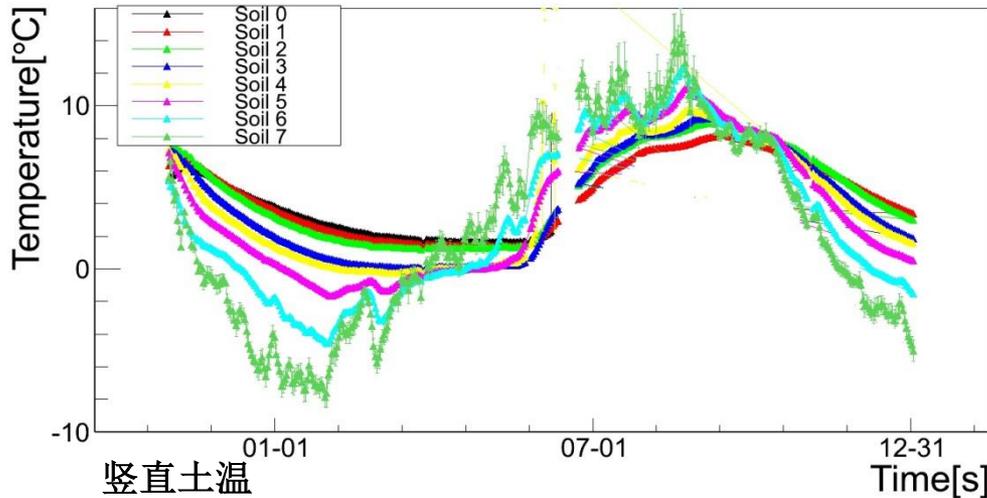
罐体外水体边界和水体中心对应外置



横向水温和罐体外横向土温

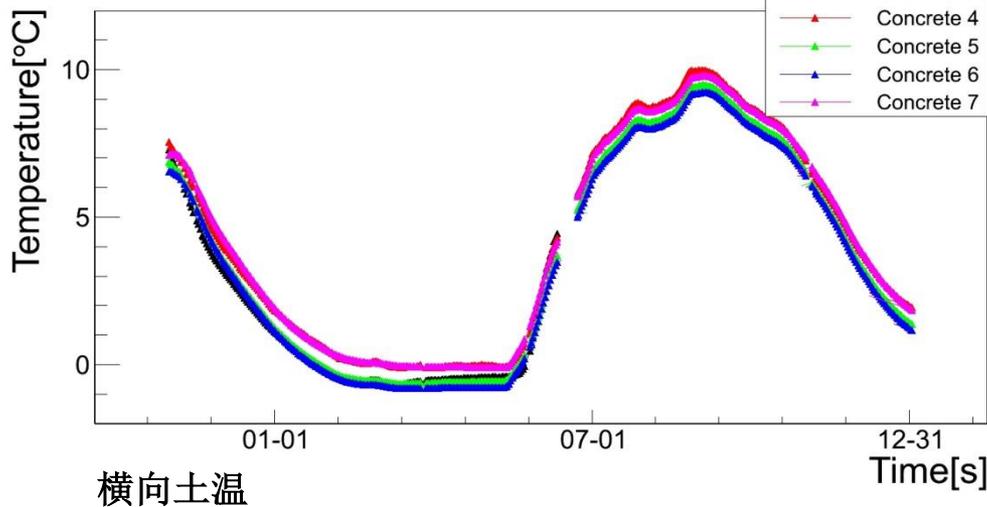
沼泽水袋土温

Marsh soil temperature sensor



垂直土温

Marsh concrete temperature sensor



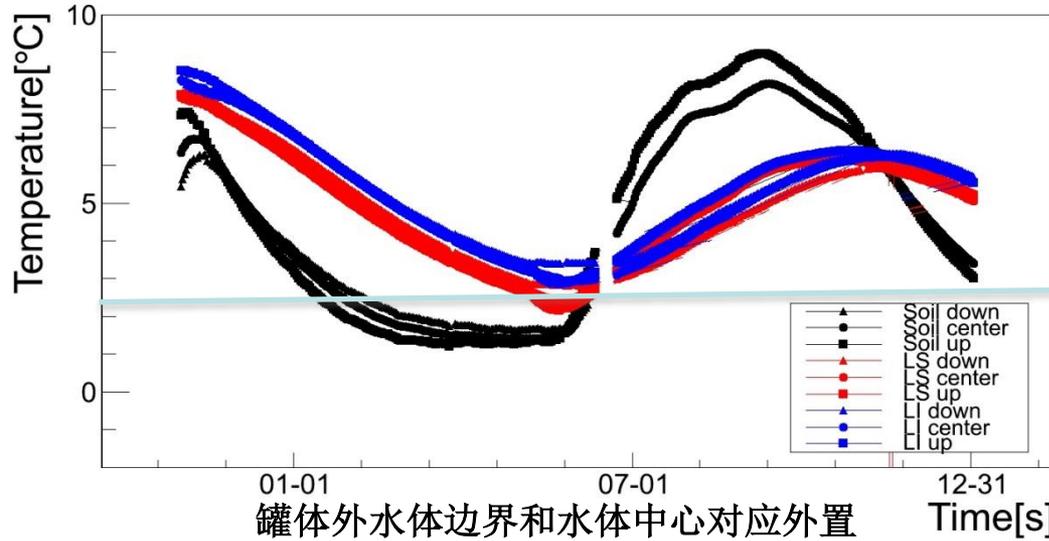
横向土温



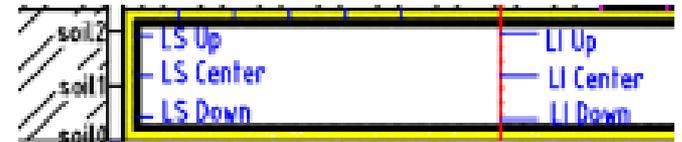
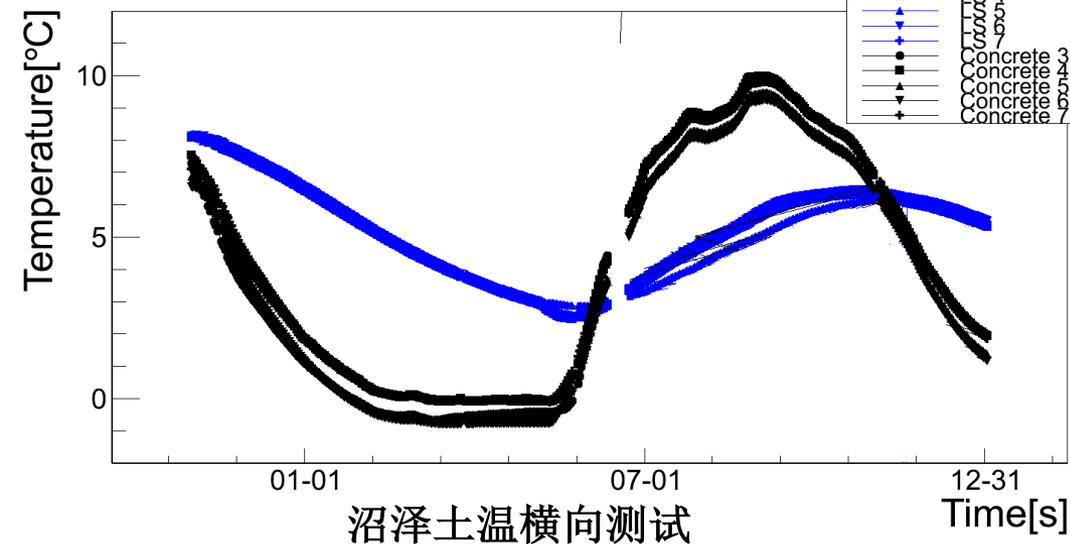
横向土温

沼泽水袋水温与土温对比

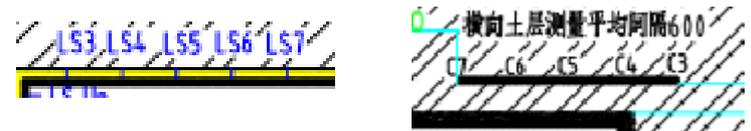
Marsh Comparison



Marsh Comparison



罐体外水体边界和水体中心对应外置

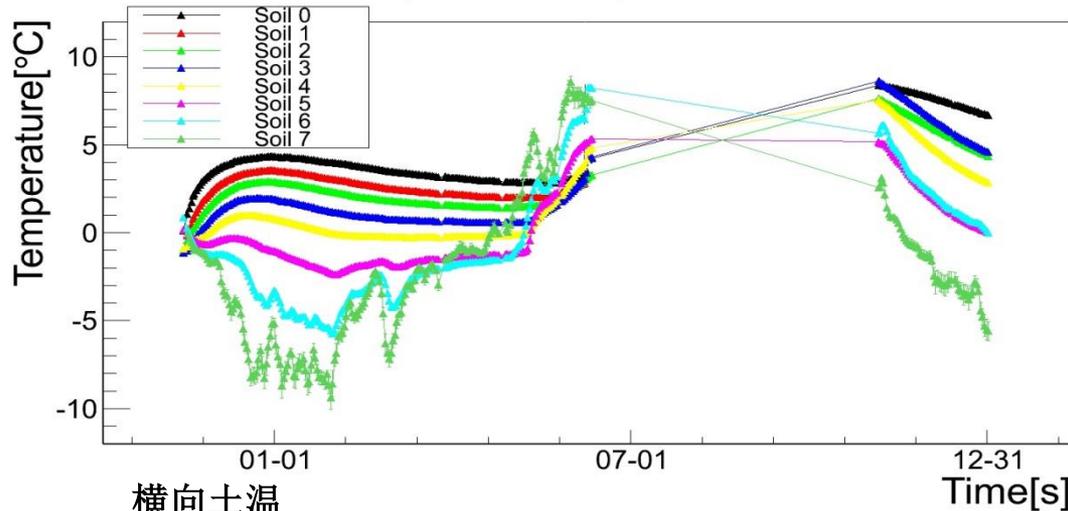


沼泽土温横向测试

深埋水袋土温

垂直土温

Deep buried soil temperature sensor



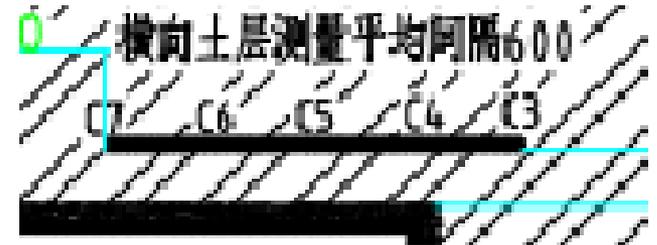
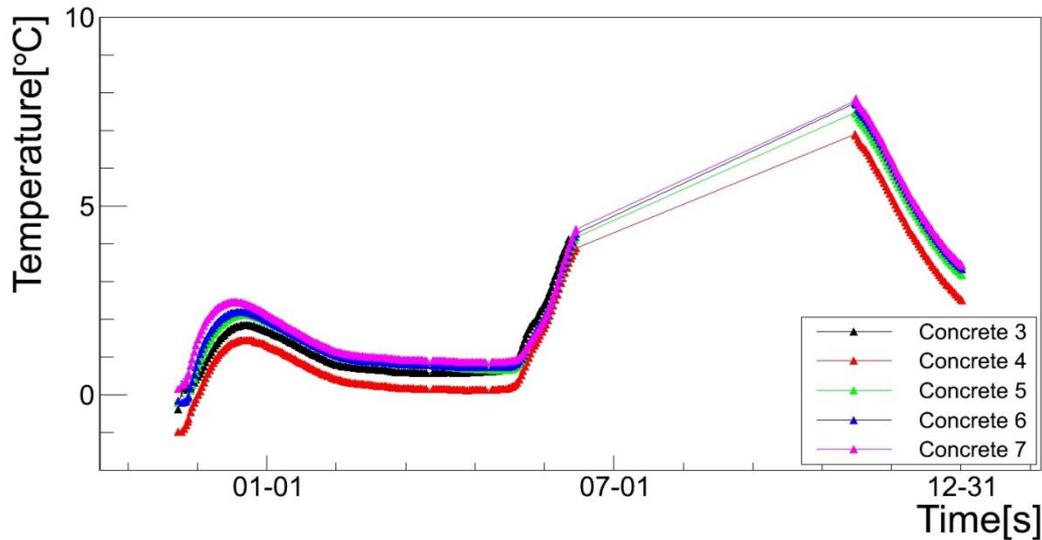
土层 垂直间隔平均500



垂直土温

横向土温

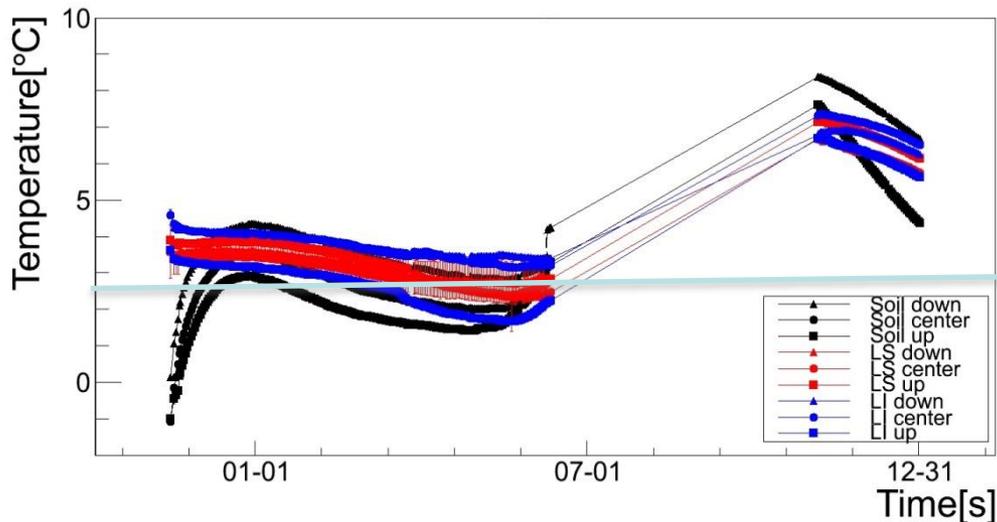
Deep buried concrete temperature sensor



横向土温

深埋水袋水温与土温对比

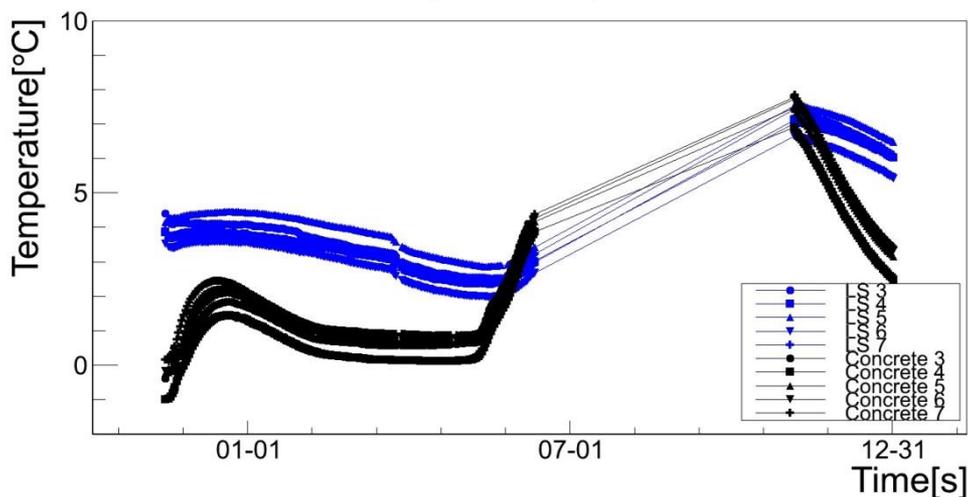
Deep buried Comparison



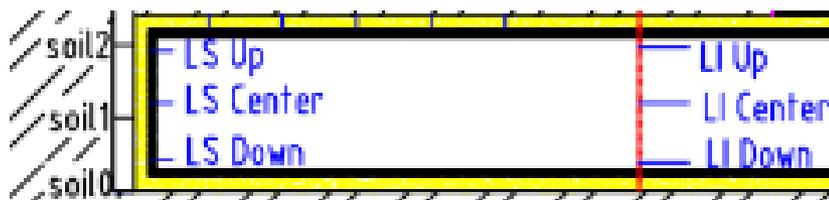
罐体外水体边界和罐体中心对应外置

模拟值最低2.57度

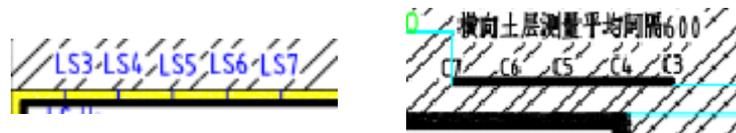
Deep buried Comparison



横向水温 and 罐体外横向土温



罐体外水体边界和罐体中心对应外置



横向水温和罐体外横向土温

稻城保温实验小结

- 1、保温数据与模拟结果基本吻合；
- 2、保温材料的保温效果明显；
- 3、浅埋和深埋的竖直土温在大于1.5m深度后每增加0.5m土温高 0.8°C - 1°C ；
- 4、浅埋罐体的水温月降幅为 1.2°C ；沼泽罐体的水温月降幅为 0.7°C ；深埋罐体的水温月降幅为 0.26°C ；

4.保温材料性能

——抗压性和长期稳定性

1.2米水对罐体底面的压强为12KPa

| 序号 | 要求 |
|-------------------------|---------|
| 密度 (Kg/m ³) | ≥ 20 |
| 导热系数/[W/(m*K)] | ≤ 0.041 |
| 压缩性能 (形变10%) /KPa | ≥ 150 |
| 尺寸稳定性 (70°C, 48h) % | ≤ 1.5 |

保温材料耐久性

| 材料名称 | 耐久性 |
|--------|-----------------------------|
| 聚苯乙烯泡沫 | 湿度70%，使用50年仍能达到初始值的50% |
| 聚氨酯 | 环境温度-190°C-70°C，平均使用寿命可达25年 |

总结

- 1、保温方案可靠、易行；
- 2、保温材料的保温效果明显；
- 3、保温材料的耐久性和抗压性满足实验使用要求；