

一、稳态热分析问题

1.1 混凝土水坝上的稳态热传导问题

本章分析图 1-1 所示水坝结构在固定水温及固定空气温度的边界条件下，体内温度的分布情况。

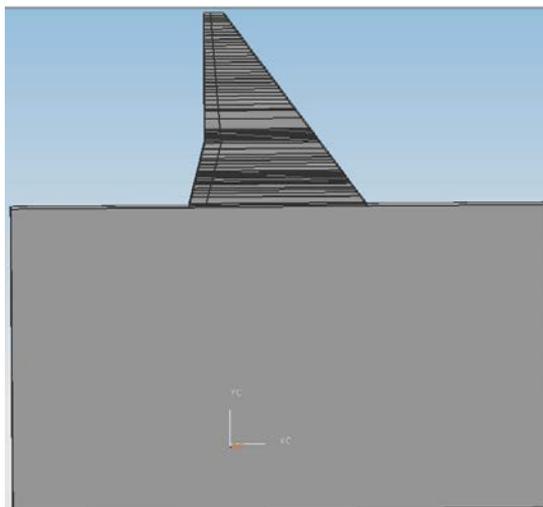


图 1-1 某重力坝段结构示意图

1.1 混凝土水坝模型

如图 1-1 所示，基岩上的坝体高度为 171m，不均匀地分为 62 层（与其建设过程中的浇筑层保持一致），第一浇筑层底部与基岩接触部分宽 157m。基岩高度 270m，宽 471m，考虑对称性，模型厚度取为 20m。大坝模型左侧为上游面，右侧为下游面，上游面假设蓄水高度为 375m，距坝体最顶端 9m。

1.2 大坝的材料参数

坝段建造采用两种不同的混凝土材料：

1. 第一二浇筑层与基岩基岩材料相同，热传导系数： $8.776\text{kJ}/(\text{m}\cdot\text{h}^{\circ}\text{C})$ ，密度： $2450\text{kg}/\text{m}^3$ ，比热： $0.9627\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$ ；
2. 其他浇筑层：热传导系数： $9.27\text{kJ}/(\text{m}\cdot\text{h}^{\circ}\text{C})$ ，密度： $2400\text{kg}/\text{m}^3$ ，比热： $0.9627\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$ 。

1.3 边界条件

基岩左右两侧及底部绝热，模型厚度方向前后面绝热，上游面蓄水区（蓄水高度 375m）添加水温边界条件，上游面 375m 以上、顶部表面、下游面添加空气边界，当地年平均气温为 20.7°C 。其中水温边界如下：

1. 水温在在深度 0-123.4m 随深度拟合为线性变化，其拟合函数为：

$$T_w = 20.7 - 0.0591572 * h \quad (2-3-10)$$

2. 在距水面 123.4m 以下，温度取深水温度 13.4⁰C。

1.4 网格

为做对比分析，除了使用边界面方法分析之外，还采用基于有限元方法的商用软件 ABAQUS 11.0 对此结构进行稳态热分析，在分析过程中一共使用了 47432 个二次六面体单元，共计 272300 个计算节点，如图 1-2 所示。

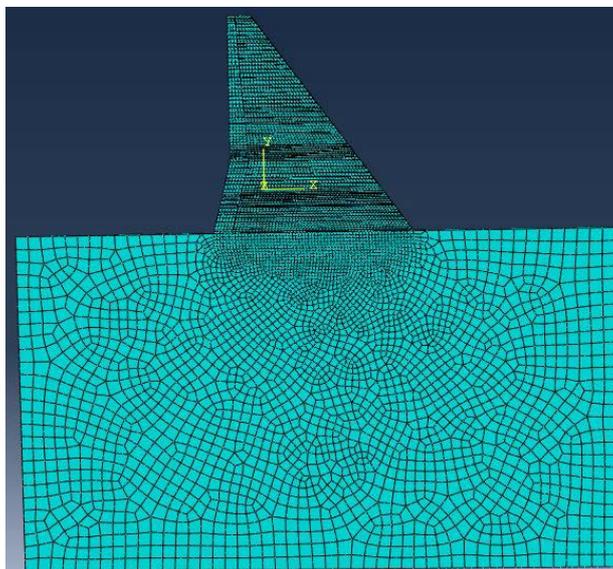


图 1-2 有限元网格

在使用边界面法进行分析的过程中，共划分 6494 个二次单元（包括三角形单元和四边形单元），共 29139 个计算节点，如图 1-3 所示。

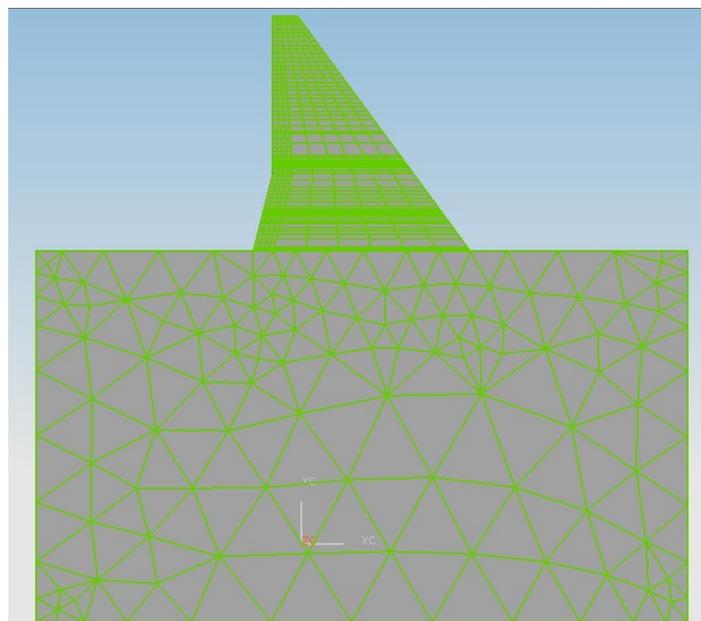
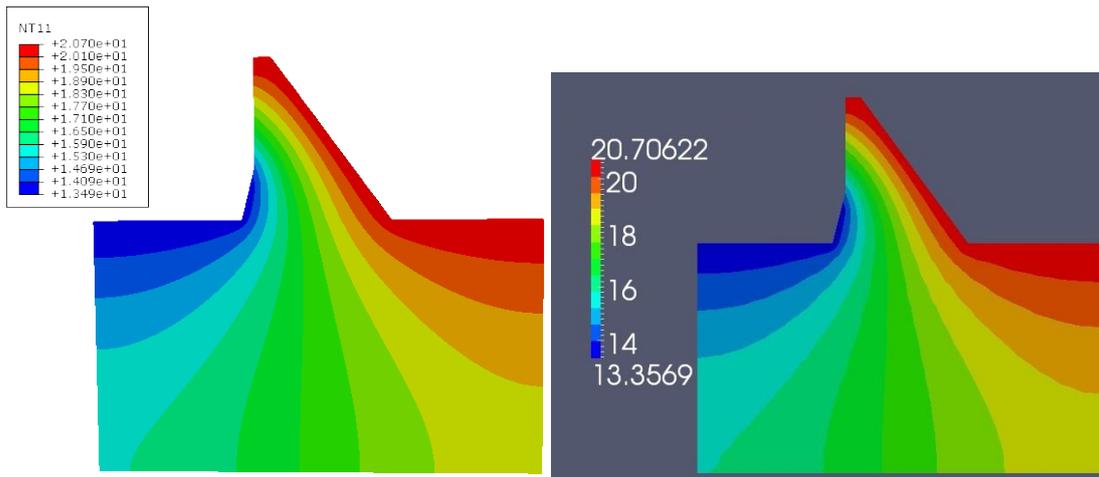


图 1-3 BFM 网格

1.5 边界面法求解结果以及和有限元的对比

图 1-4 为 ABAQUS 与 BFM 温度分布的计算结果对比。



(a) 有限元 (Abaqus) 计算结果

(b) BFM 计算结果

图 1-4 有限元与 BFM 温度分布对比

对比上图，可以看出边界面法分析结果与 ABAQUS 分析结果高度一致。因此，边界面方法应用于大规模工程结构的稳态热分析，具有良好的精度。

二、弹性静力学问题

本章分析图 2-1 所示水坝结构弹性力学问题。如图 2-1 所示重力坝模型，共包含两个域，坝体部分和基岩部分。大坝模型基座长 147m，高 100m，上部高 65m，顶部宽 15m，倾斜部位坡度：1:0.73，上部与基座接触部位位于基座正中间，宽 49m。

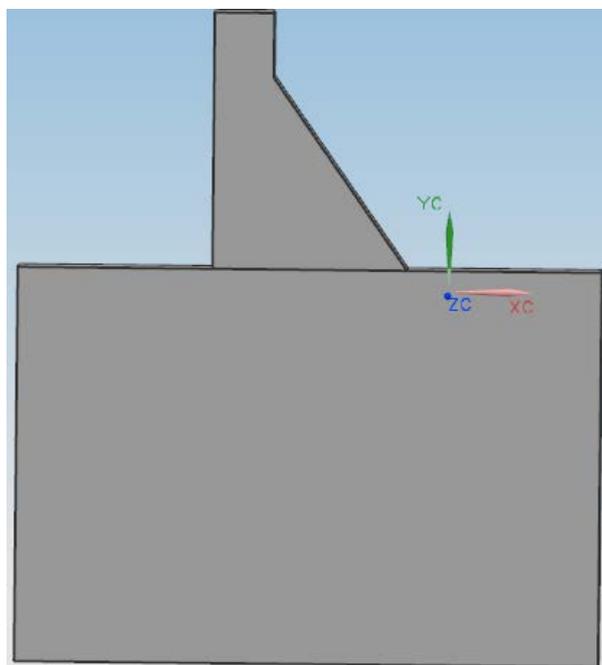


图 2-1 简单重力坝模型

2.1.1 无体力弹性力学问题分析

设大坝的材料参数如下：密度： $1 \text{ kg} / \text{m}^3$ ，泊松比：0.25，杨氏模量：1。边

界条件为分别为线性位移场和二次位移场，线性位移场如下

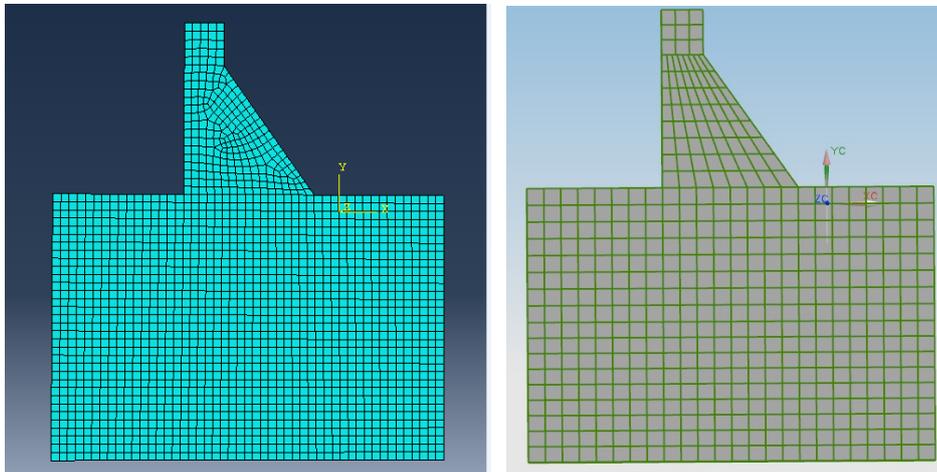
$$\begin{cases} u_x = x + 0.5y + 0.5z \\ u_y = 0.5x + y + 0.5z \\ u_z = 0.5x + 0.5y + z \end{cases}$$

二次位移场如下：

$$\begin{cases} u_x = -2x^2 + 3y^2 + 3z^2 \\ u_y = 3x^2 - 2y^2 + 3z^2 \\ u_z = 3x^2 + 3y^2 - 2z^2 \end{cases}$$

2.1.2 有限元与边界面法求解结果

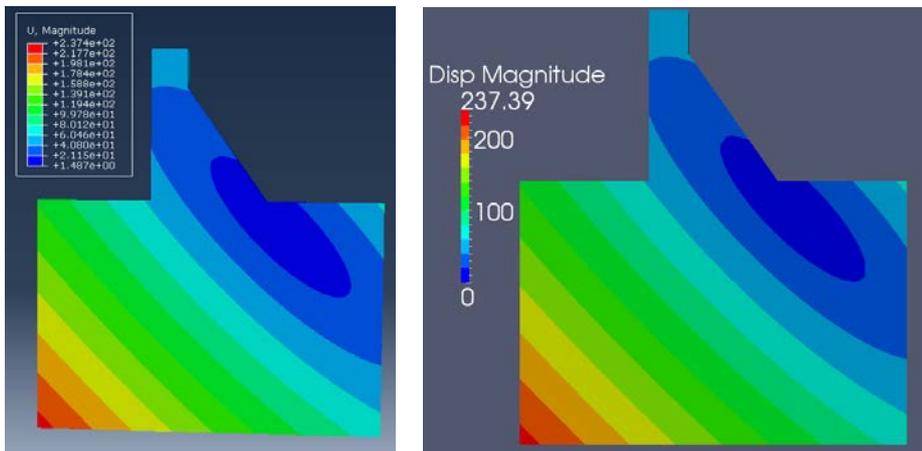
为做对比分析，除了使用边界面方法分析之外，还采用基于有限元方法的商用软件 ABAQUS 11.0 对此结构进行弹性力学分析。有限元软件 ABAQUS，采用六面体二次体单元，共计 5583 单元，29011 节点，如图 2.1-1(a)所示。边界面法采用四边形二次面单元，共计 1440 单元，5458 节点，如图 2.1-1(b)所示。



(a)有限元

(b)边界面法

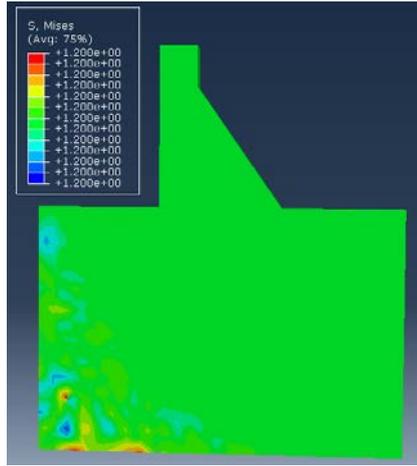
图 2.1-1 网格模型



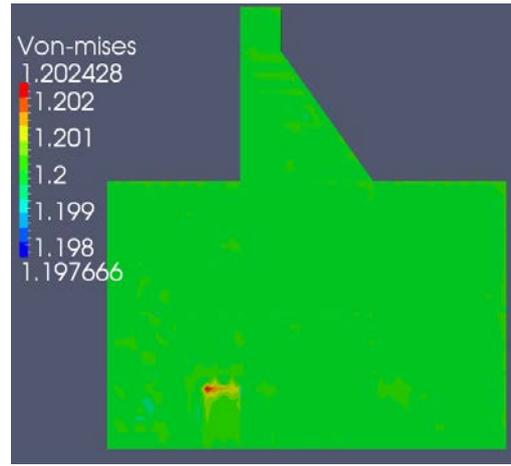
(a) 有限元 (abaqus)

(b)边界面法

图 2.1-2 线性场位移计算结果对比

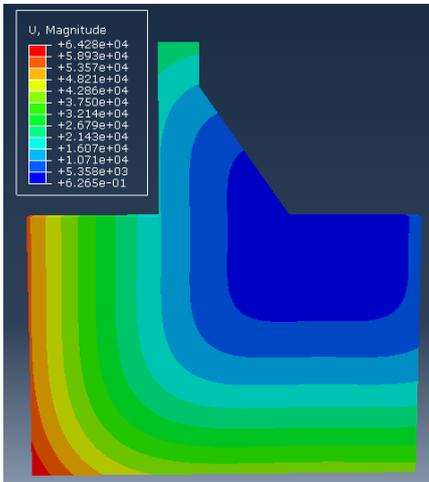


(a) 有限元 (abaqus)

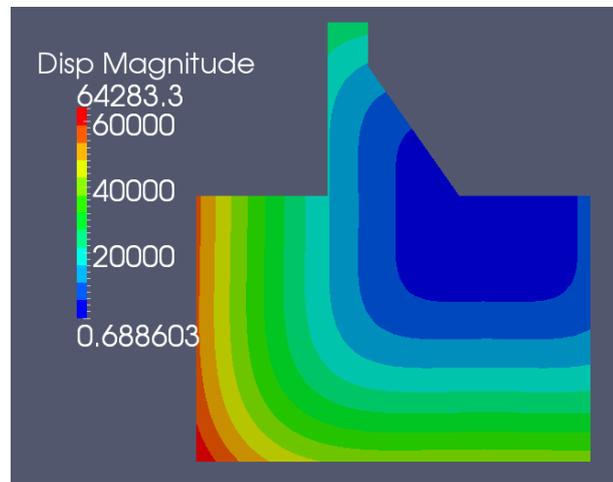


(b)边界面法

图 2.1-3 线性场应力计算结果对比

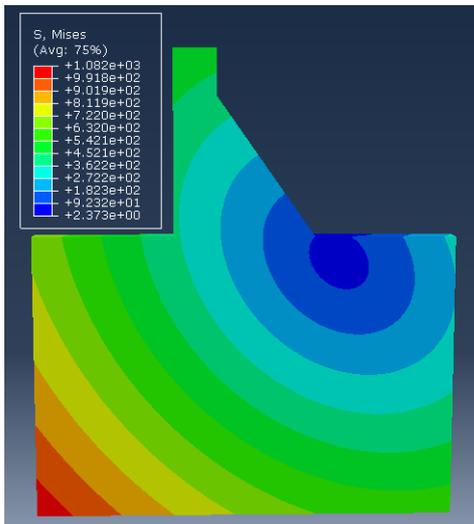


(a) 有限元 (abaqus)

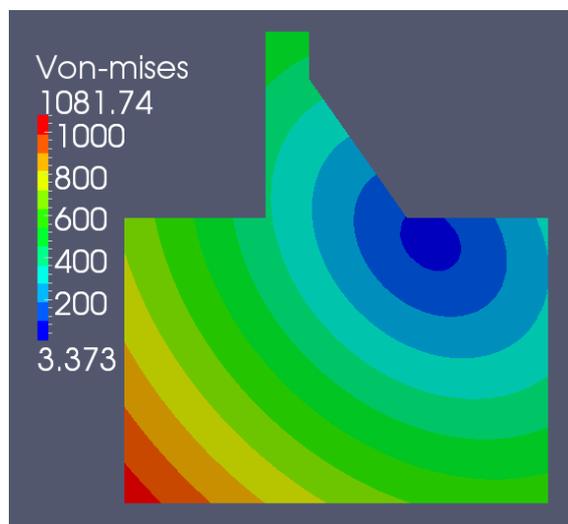


(b)边界面法

图 2.1-4 二次场位移计算结果对比



(a) 有限元 (abaqus)



(b)边界面法

图 2.1-5 二次场应力计算结果对比

2.2 带水压的重力坝弹性力学问题

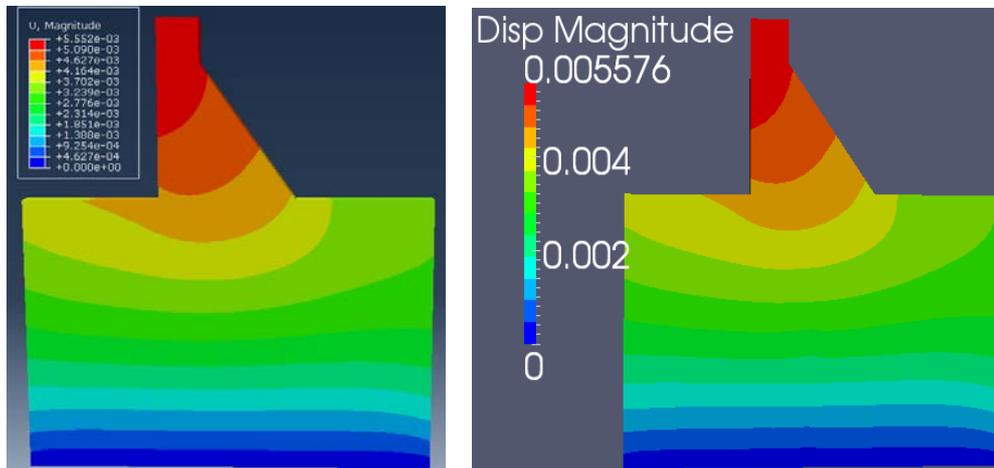
2.2.1 大坝的材料参数

基座的密度为 2450 kg/m^3 ，泊松比为 0.167，杨氏模量为 $4.1 \times 10^{10} \text{ M}$ 。坝体部分的密度为 2400 kg/m^3 ，泊松比为 0.163，杨氏模量为 $4.2 \times 10^{10} \text{ M}$ 。

边界条件：带体力，上游面距离坝顶 10 处承受水压，水的密度为 1000 kg/m^3 ，重力加速度为 9.8 m/s^2 。

2.2.2 有限元和边界面法计算结果

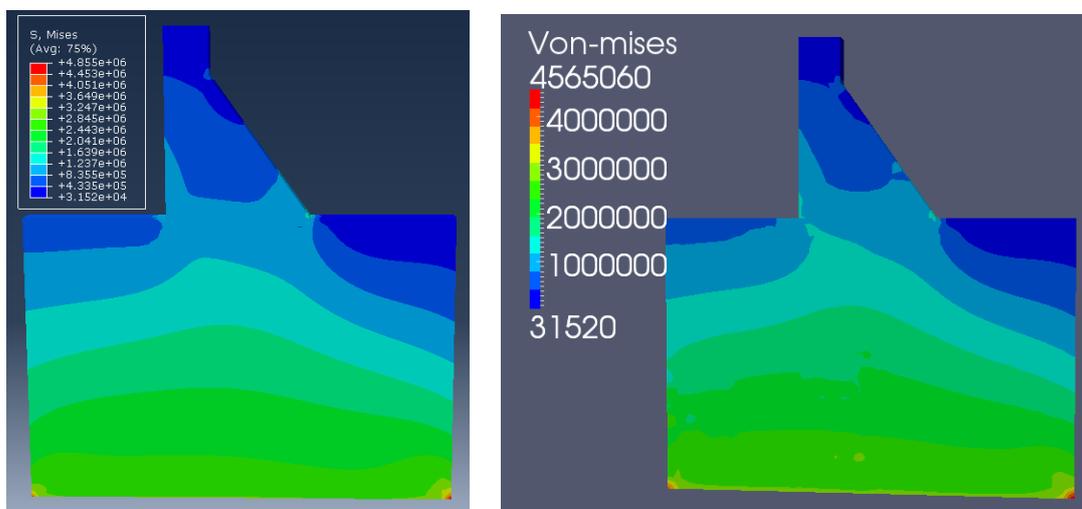
有限元法和边界面法计算结果如图 2.1-1 所示。



(a) 有限元 (abaqus)

(b) 边界面法

图 2.2-1 位移计算结果对比



(a) 有限元 (abaqus)

(b) 边界面法

图 2.2-2 应力计算结果对比

本章算例充分证明，在实际工程结构的静弹性力学问题中，边界面法具有可行性。

三、瞬态热分析

3.1 五个长方块堆成的立方体的瞬态传热分析

本节关注一个由 5 块长宽厚分别为 1m, 1m, 0.2m 的厚板沿厚度方向堆成的结构（如图 6.11 所示），初始温度为 0°C ，分析开始时，最上面的板的顶面上突然施加温度为 100°C 的边界条件并一直保持恒温，其他面绝热。板的密度为 $20\text{kg}/\text{m}^3$ ，热传导系数为 $2\text{kJ}/(\text{m}\cdot\text{h}^{\circ}\text{C})$ ，比热为 $0.8\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$ 。分析内部热量从顶面向底面传导的过程，计算总时长 9.6h，分析步长 $\Delta t = 0.2\text{h}$ 。

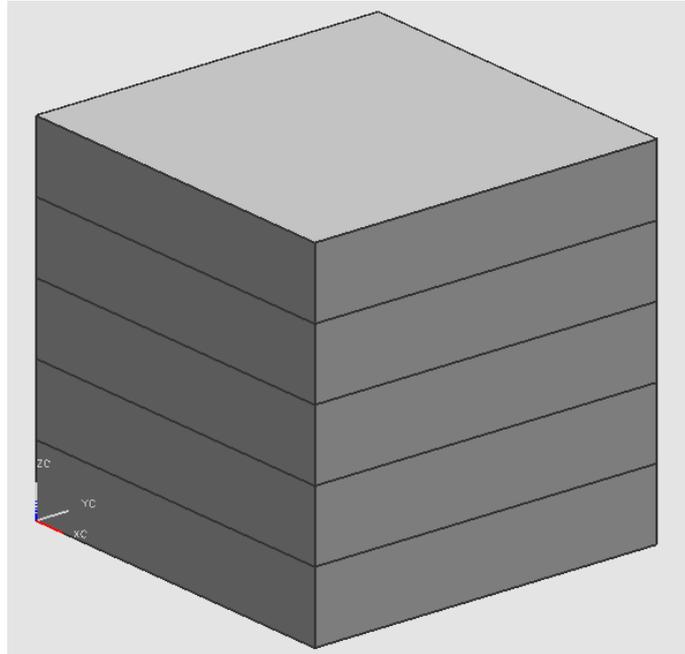
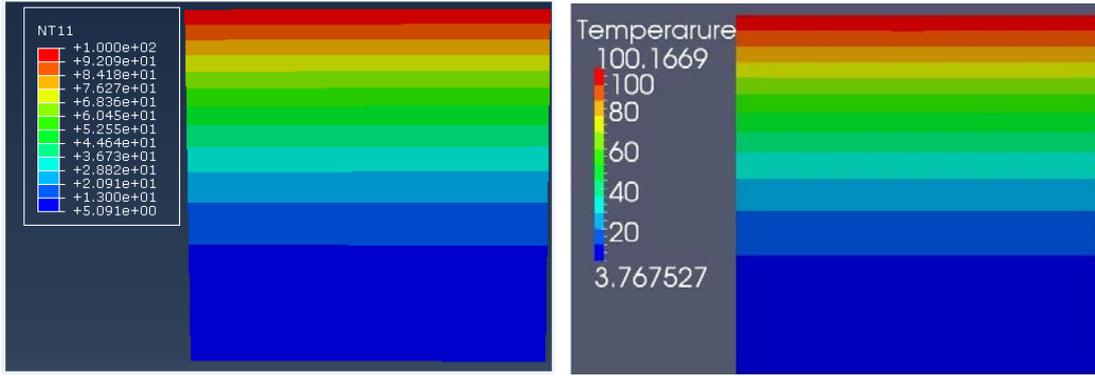


图 3.1-1 由五块厚板堆积而成的块体

为做对比分析，除了使用边界面方法分析之外，还采用基于有限元方法的商用软件 ABAQUS 11.0 对此结构进行弹性力学分析。有限元分析中，采用六面体二次体单元，共划分 8000 单元，35721 节点。

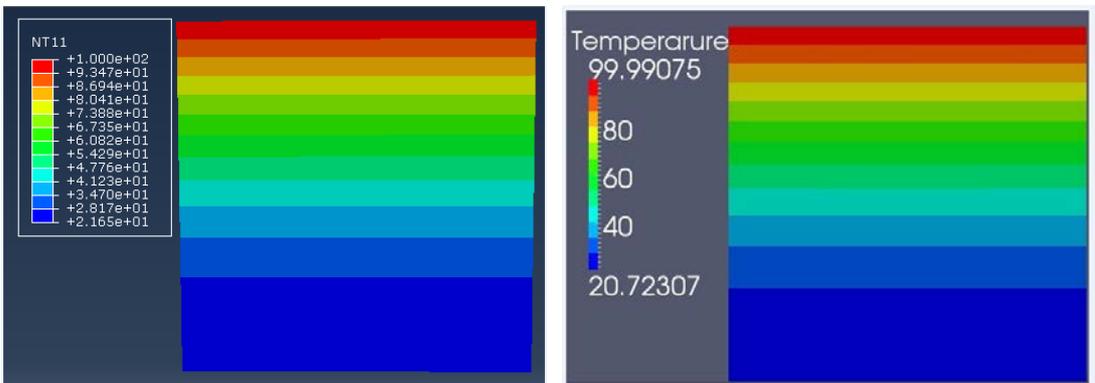
边界面法分析中，面单元采用四边形二次单元，350 个单元，共 1520 个表面节点；体单元采用四面体二次单元，共 600 个单元，1155 个内部节点。关注底面温度随时间的变化。

截取部分时间点的有限元与边界面法分析结果对比如下：



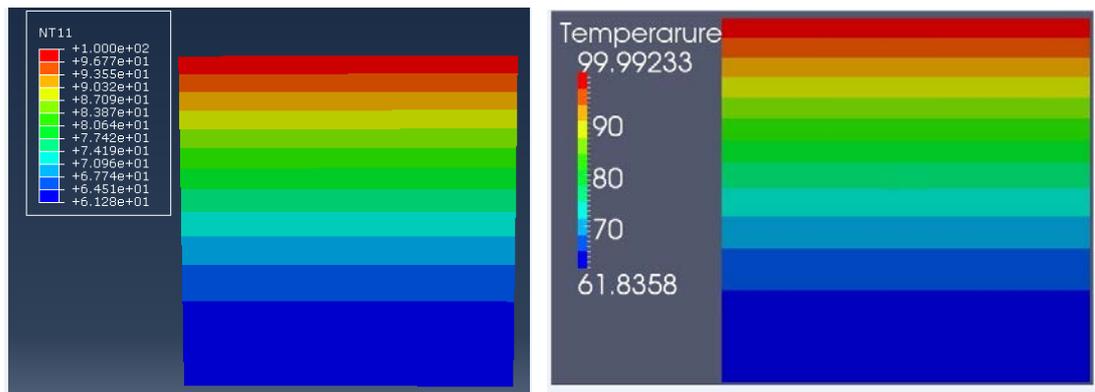
(a) 有限元 (abaqus) (b)边界面法

图 3.1-2 $t=0.8h$ 结果对比



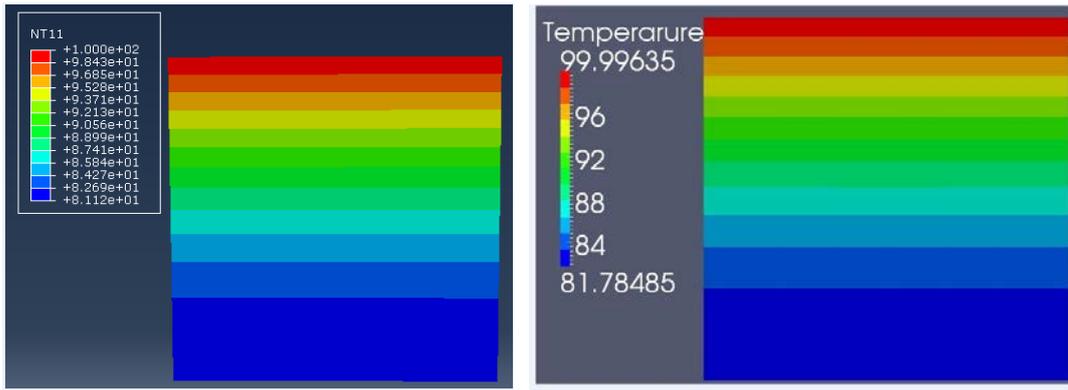
(a) 有限元 (abaqus) (b)边界面法

图 3.1-3 $t=1.6h$ 结果对比



(a) 有限元 (abaqus) (b)边界面法

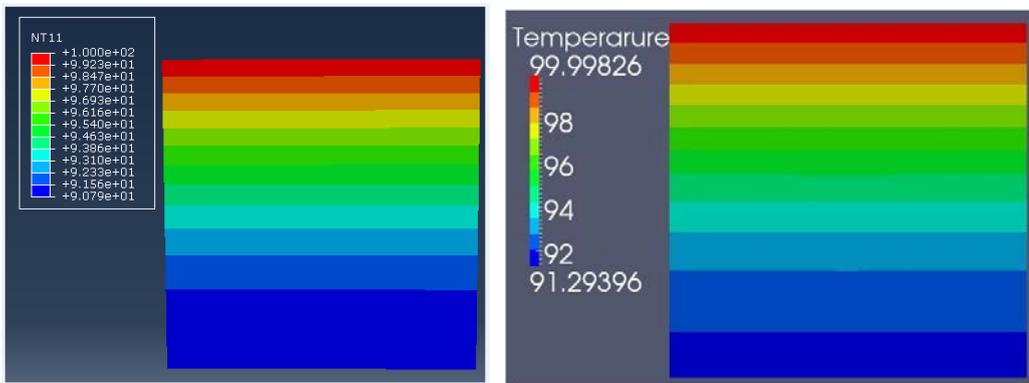
图 3.1-4 $t=4.0h$ 结果对比



(a) 有限元 (abaqus)

(b) 边界面法

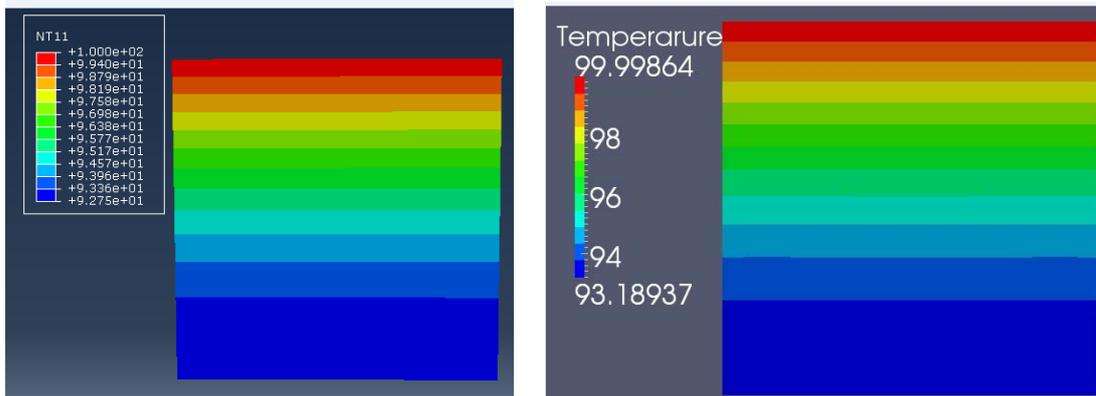
图 3.1-5 t=6.4h 结果对比



(a) 有限元 (abaqus)

(b) 边界面法

图 3.1-6 t=8.8h 结果对比



(a) 有限元 (abaqus)

(b) 边界面法

图 3.1-7 t=9.6h 结果对比

3.3 边界面求解自然冷却问题

3.3.1 自然冷却的大坝模型

本节分析图 3.3-1 所示水坝结构在水温及空气温度的边界条件下，内部温度的分布。如图 3.3-1 所示简单重力坝模型，包含两个域，坝体部分和基岩部分。大坝模型基座长 147m，高 100m，上部高 65m，顶部宽 15m，倾斜部位坡度：1:0.73，

坝体与基座接触部位位于基座正中央，宽 49m。

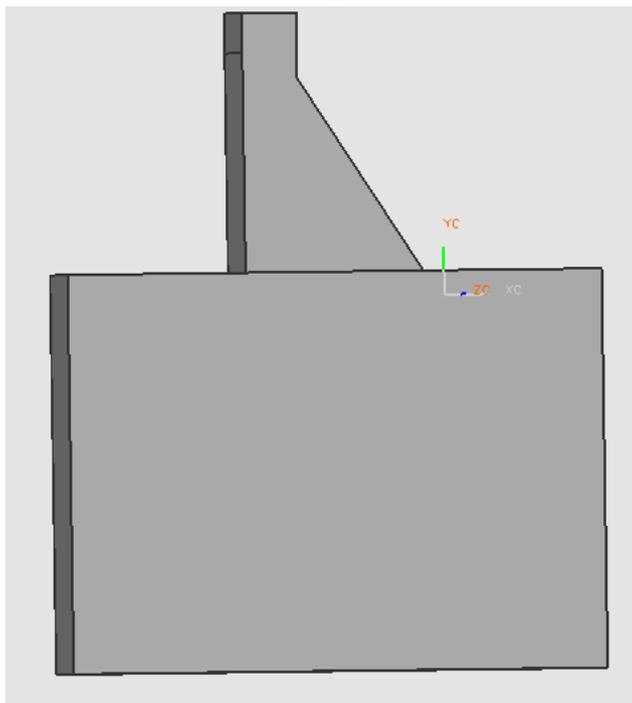


图 3.3-1: 自然冷却的大坝模型

3.3.2 大坝的材料参数

大坝材料性质如下：

导热系数： $\lambda = 234kJ / (M \cdot d \cdot ^\circ C)$ ，

比热： $\lambda = 0.0888kJ / (M \cdot d \cdot ^\circ C)$ ，

密度： $\rho = 2539kg / m^3$ 。

3.3.3 大坝的初始条件和边界条件

浇筑层混凝土初温， $T_0 = 20^\circ C$ ，基座初温： $0^\circ C$ 。边界条件：模型一周固定

温度 $0^\circ C$ ，且无热源。

3.3.4 网格

关注 8 年内坝体及基岩内温度的分布变化。为做对比分析，使用成熟的有限元商业软件 ANSYS 11.0 对此结构进行瞬态热分析。在有限元分析中不考虑坝体厚度，采用二维平面模型，采用四节点四边形单元，共 1585 个单元，1682 个计算节点。分析步长 1d。如图 3.3-2 所示。

边界面分析中，面网格采用三角形单元，共 3896 个单元，2418 个面节点；体网格采用四面体线性单元，共 12875 个单元，3412 个内部节点。8 年的时间一共被分为 384 个增量步。

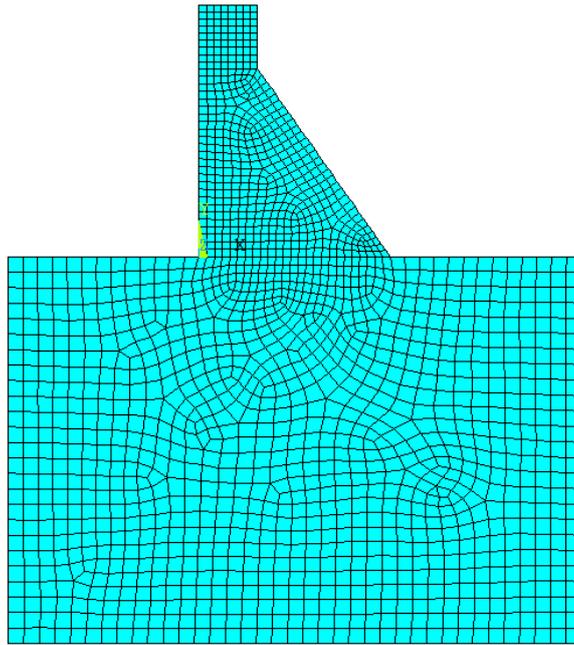
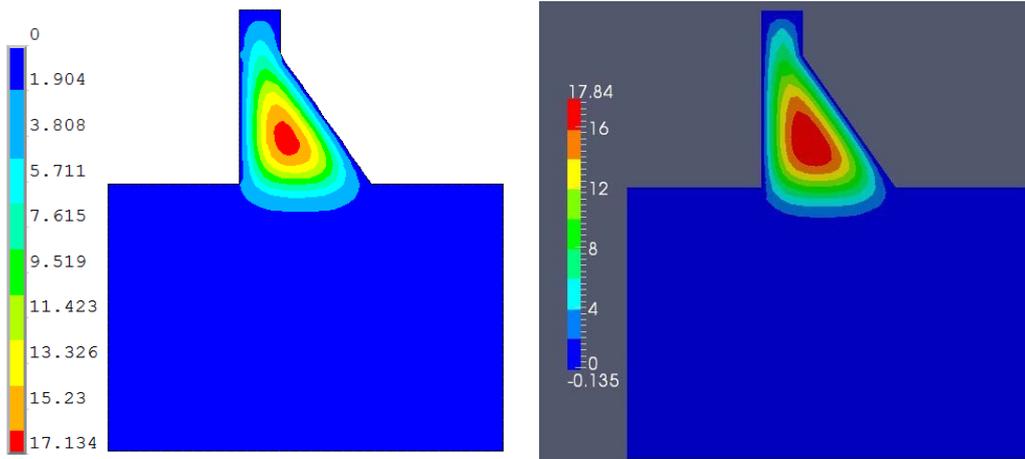


图 3.3-2 ANSYS 网格模型

3.3.5 有限元与边界面法分析结果对比

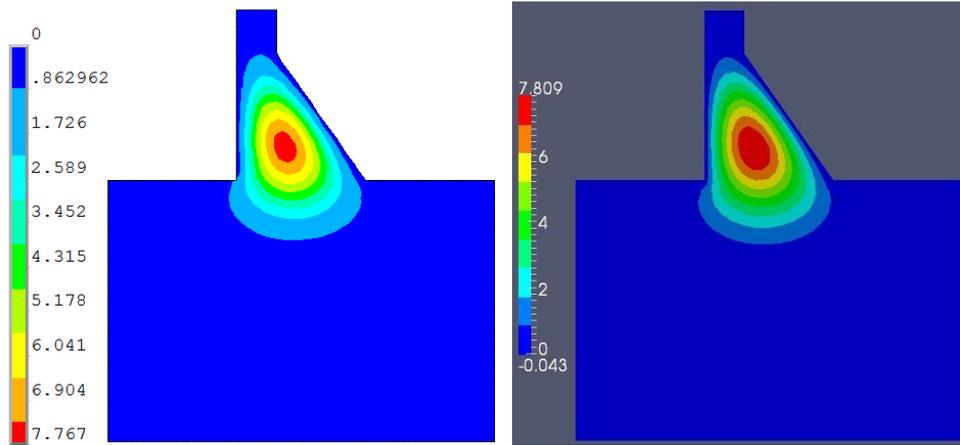
截取部分时间点（1 年，3 年，5 年，8 年）的温度分布云图对比如下：



(a) ANSYS

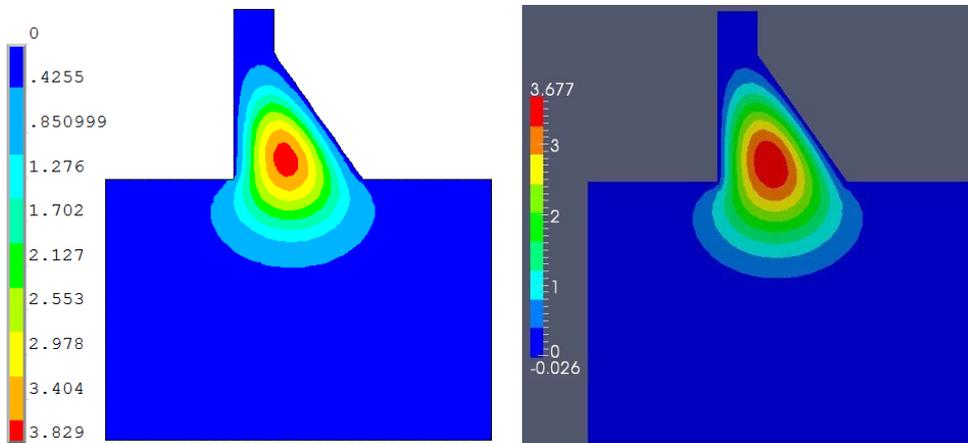
(b) 边界面

图 3.3-3 1 年时坝体上温度分布



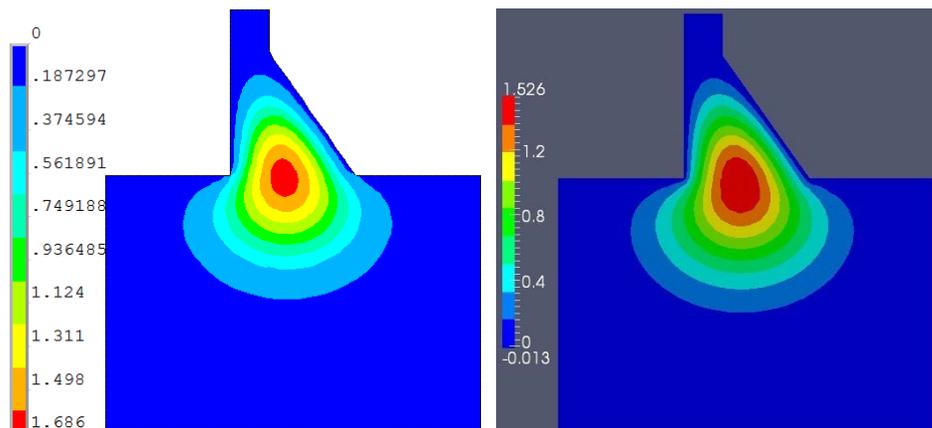
(a) ANSYS (b) 边界面

图 3.3-4 3 年时坝体上温度分布



(a) ANSYS (b) 边界面

图 3.3-5 5 年时坝体上温度分布



(a) ANSYS (b) 边界面

图 3.3-6 8 年时坝体上温度分布

本章的算例充分证明，在实际工程结构的瞬态热分析中，边界面法具有应用可行性。

3.4 边界面求解瞬态多域问题

3.4.1 岩基上 1m 厚单层浇筑块温度计算



图 3.4-1 1 层 1 米的浇筑块模型

1. 模型尺寸：如图 3.4-1 所示，浇筑层长 25m，厚 1m，基岩长 100m，高 20m。
2. 材料参数：导热系数： $\lambda = 10.0 \text{kJ}/(\text{M} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$ ，表面放热系数： $\beta = 60.0 \text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$ 。
3. 初始条件和边界条件：混凝土初温： $T_0 = 0^\circ\text{C}$ ，气温： $T_0 = 0^\circ\text{C}$ ，
4. 热源：混凝土绝热温升： $\theta(\tau) = 25.0\tau/(4.50 + \tau)$ ，基岩绝热温升： $\theta(\tau) = 0$ 。
5. 网格：

有限元软件 ANSYS 网格模型如图 3.4-2(a)所示：由于有限元计算中采用的是二维模型，因此网格采用四节点四边形单元，每一个面的 X 方向分为单元数 15，Y 方向分为单元数 6，共计 499 个节点，450 个单元，分析步长 $0.5d$ 。

边界面法计算中采用的网格模型如图 3.4-2(b)所示，面网格采用四边形八节点单元，共 2379 个单元，8037 个节点。体网格采用六面体二十节点单元，共 4880 个单元，24095 个节点。

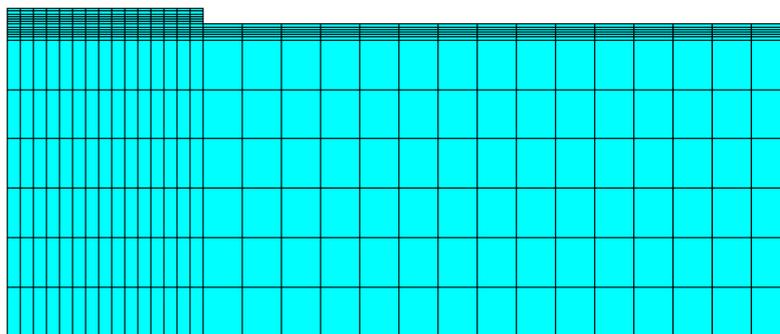


图 3.4-2(a) 有限元网格模型（1m 厚单层浇筑块）

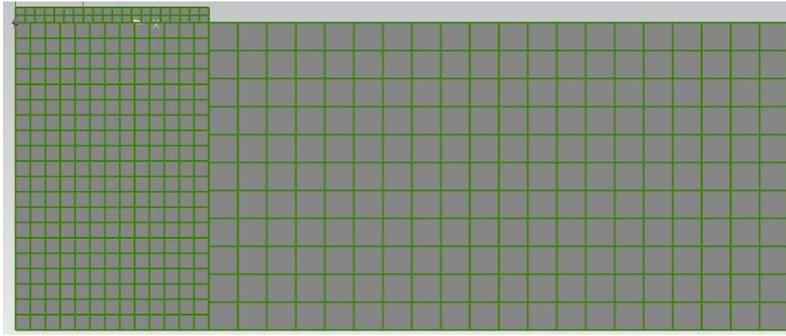


图 3.4-2(b) 边界面法网格模型 (1m 厚单层浇筑块)

选取图 3.4-1 中所示 A-A 截面上的各个节点进行结果输出, 做出 A-A 截面上的不同时间的温度分布如下:

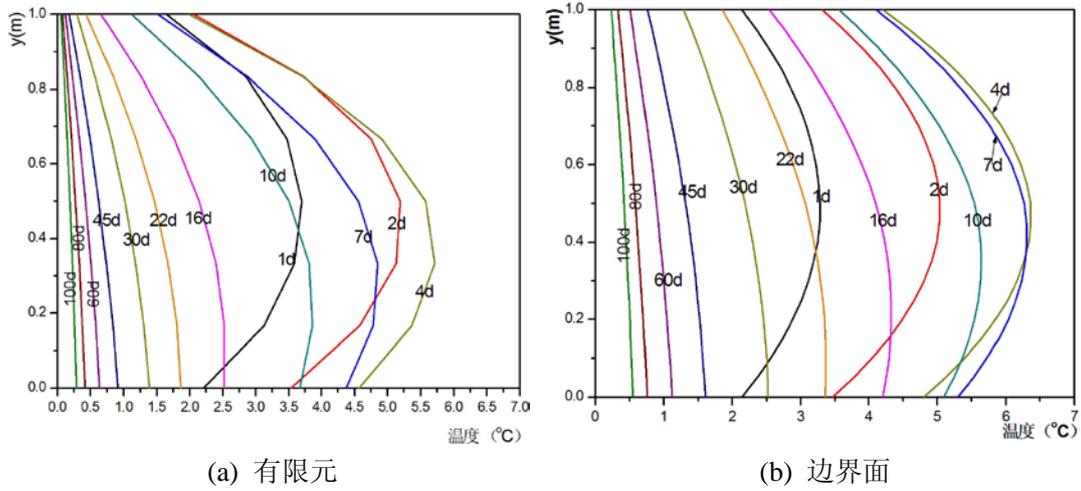


图 3.4-3 1m 厚单层浇筑块计算结果

截取部分时间点的结果云图对比如下:

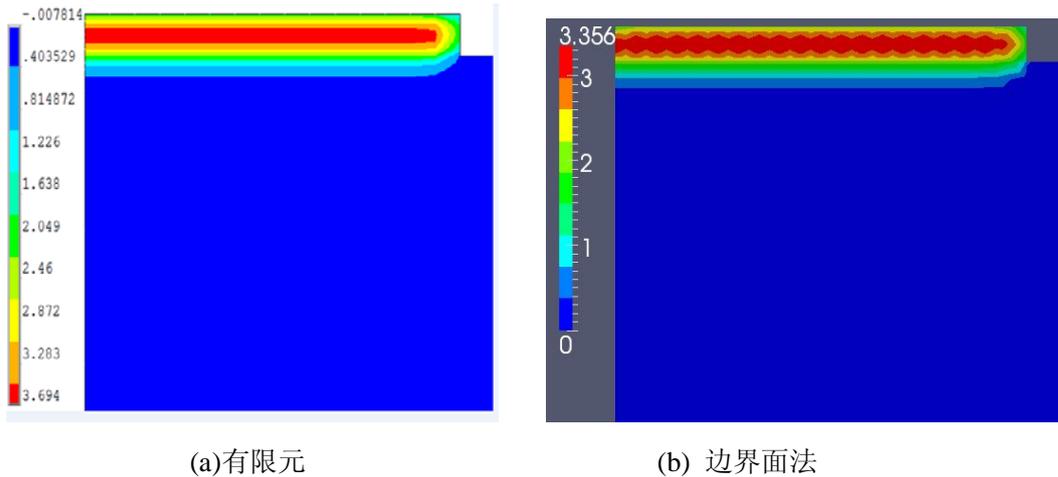
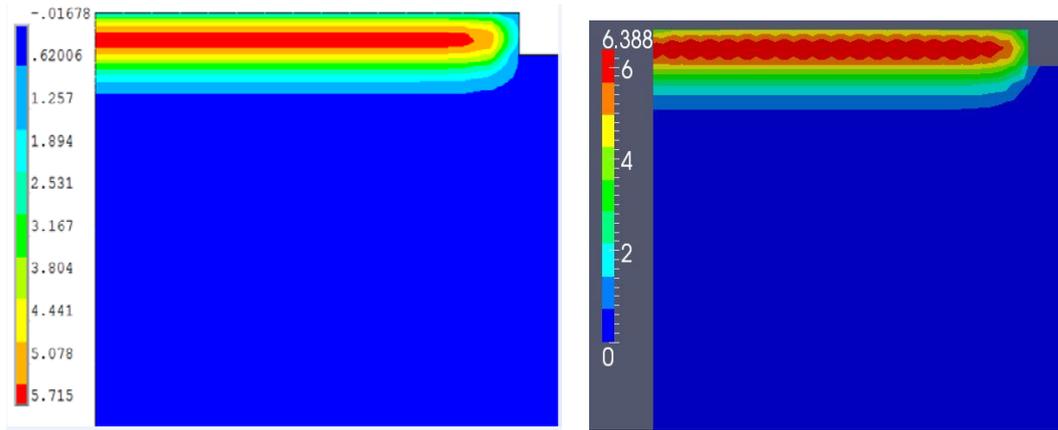
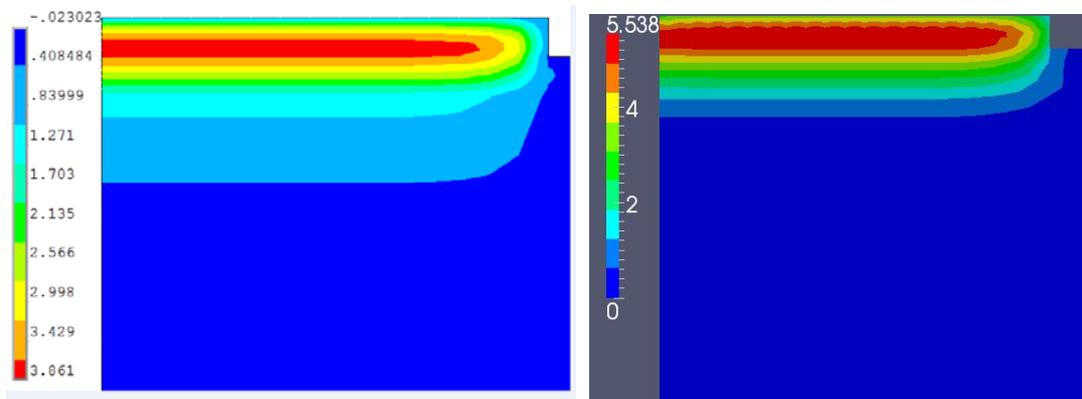


图 3.4-4 1m 浇筑块温度场云图对比 (t=1d)



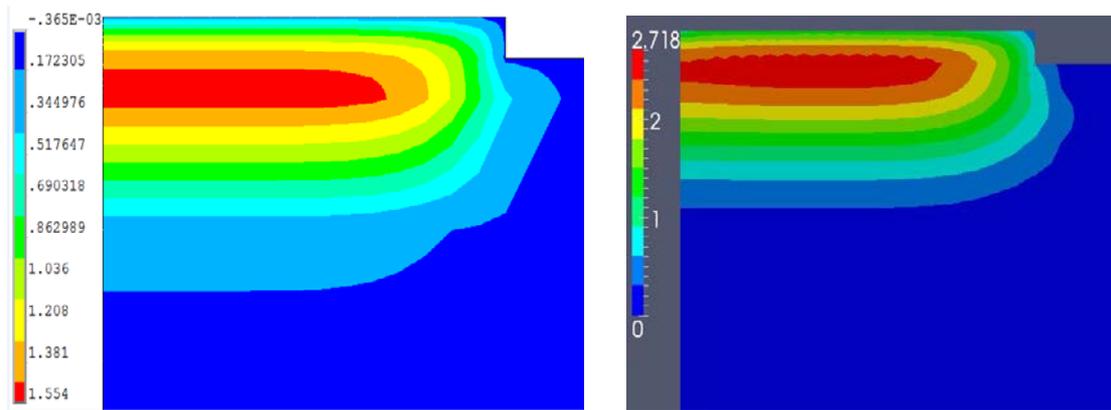
(a) 有限元 (b) 边界面法

图 3.4-5 1m 浇筑块温度场云图对比 (t=4d)



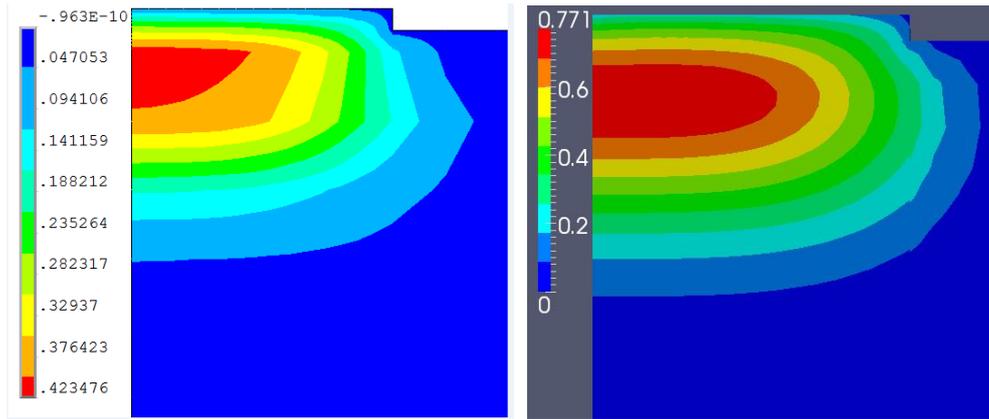
(a) 有限元 (b) 边界面法

图 3.4-6 1m 浇筑块温度场云图对比 (t=10d)



(a) 有限元 (b) 边界面法

图 3.4-7 1m 浇筑块温度场云图对比 (t=30d)



(a) 有限元 (b) 边界面法
图 3.4-8 1m 浇筑块温度场云图对比 (t=100d)

3.4.2 岩基上 2m 厚单层浇筑块温度计算



图 3.4-9 2m 厚单层浇筑块模型

1. 模型尺寸：如图 3.4-9 所示，浇筑层长 25m，厚 1m，基岩长 100m，高 20m。
2. 材料参数：导热系数： $\lambda = 10.0 \text{kJ}/(\text{M} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$ ，表面放热系数： $\beta = 60.0 \text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$ 。
3. 初始条件和边界条件：混凝土初温： $T_0 = 0^\circ\text{C}$ ，气温： $T_0 = 0^\circ\text{C}$ ，
4. 热源：混凝土绝热温升： $\theta(\tau) = 25.0\tau / (4.50 + \tau)$ ，基岩绝热温升： $\theta(\tau) = 0$ 。
5. 网格：

有限元软件 ANSYS 网格模型如图 3.4-10(a)所示：由于有限元计算中采用的是二维模型，因此网格采用四节点四边形单元，每一个面的 X 方向分为单元数 15，Y 方向分为单元数 6，共计 499 个节点，450 个单元，分析步长 0.5d。

边界面法计算中采用的网格模型如图 3.4-10(b)所示，面网格采用四边形八节点单元，共 2451 个单元，8261 个节点。体网格采用六面体二十节点单元，共 5520 个单元，26875 个节点。

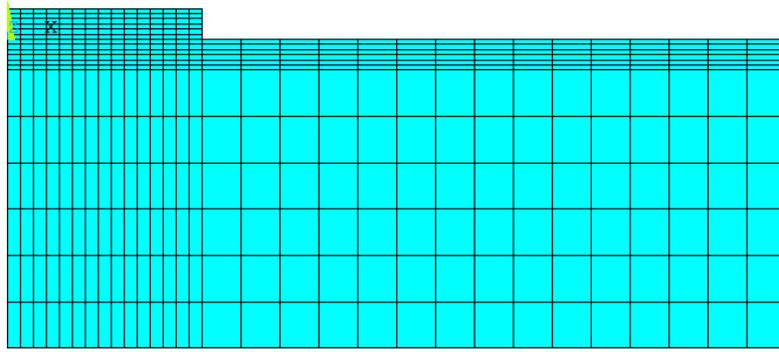


图 3.4-10(a) 有限元网格模型 (2m 厚单层浇筑块)

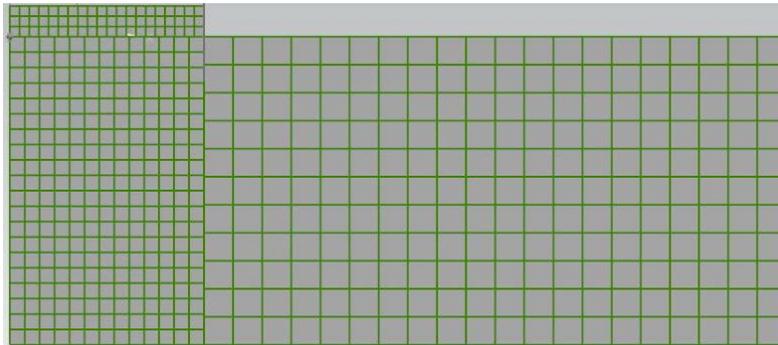
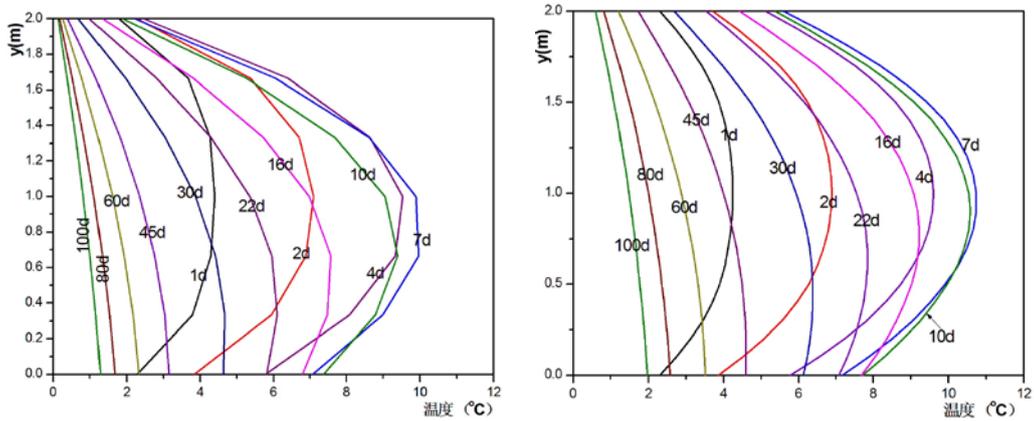


图 3.4-10(b) 边界面法网格模型 (2m 厚单层浇筑块)

选取图 3.4-9 中所示 A-A 截面上的各个节点进行结果输出，做出 A-A 截面上的不同时间的温度分布如下：

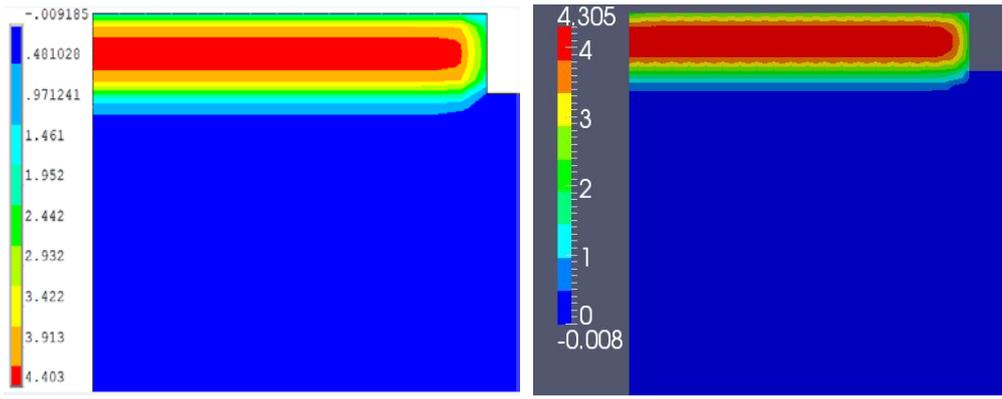


(a) 有限元

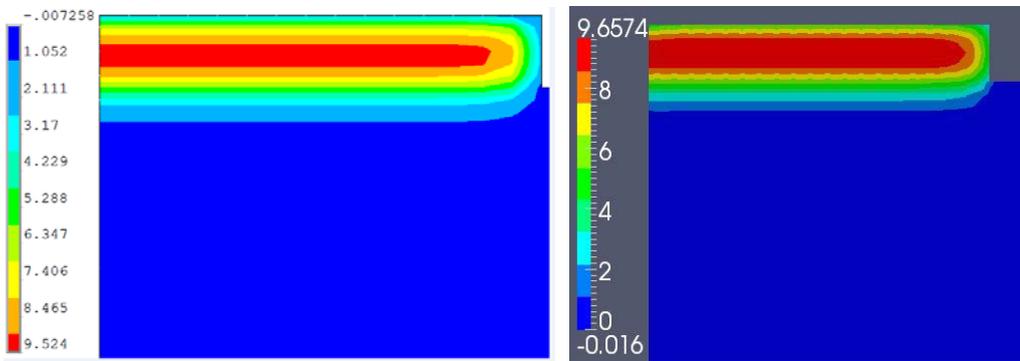
(b) 边界面

图 3.4-11 1层2米浇筑块计算结果

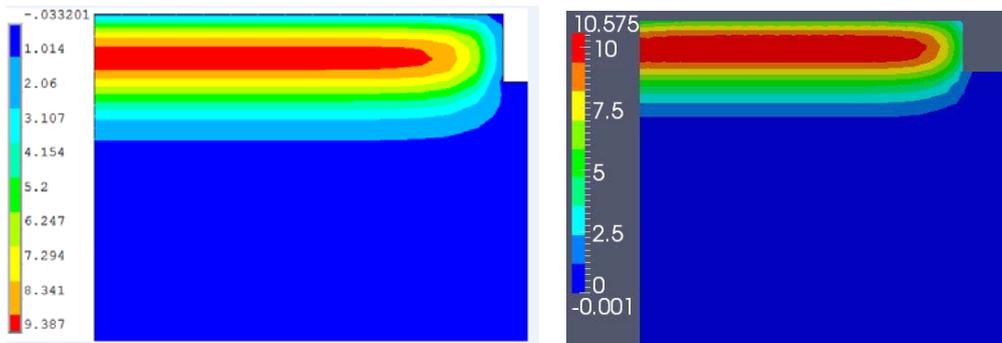
截取部分时间点的结果云图对比如下：



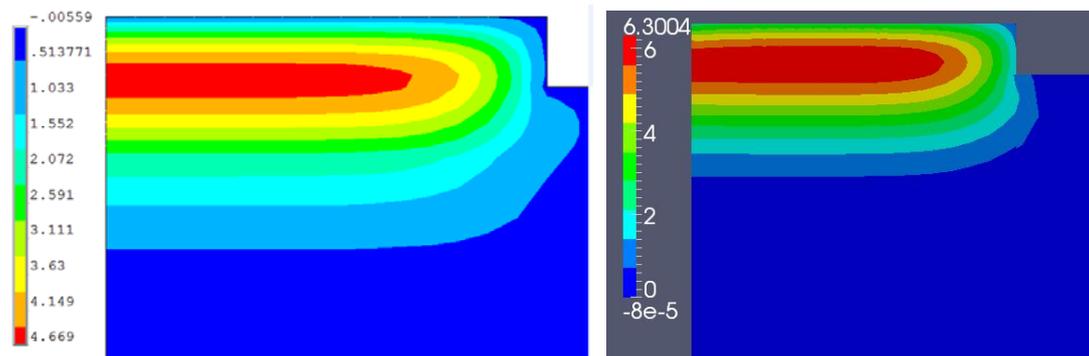
(a) 有限元 (b) 边界面法
图 3.4-12 2m 浇筑块温度场云图对比 (t=1d)



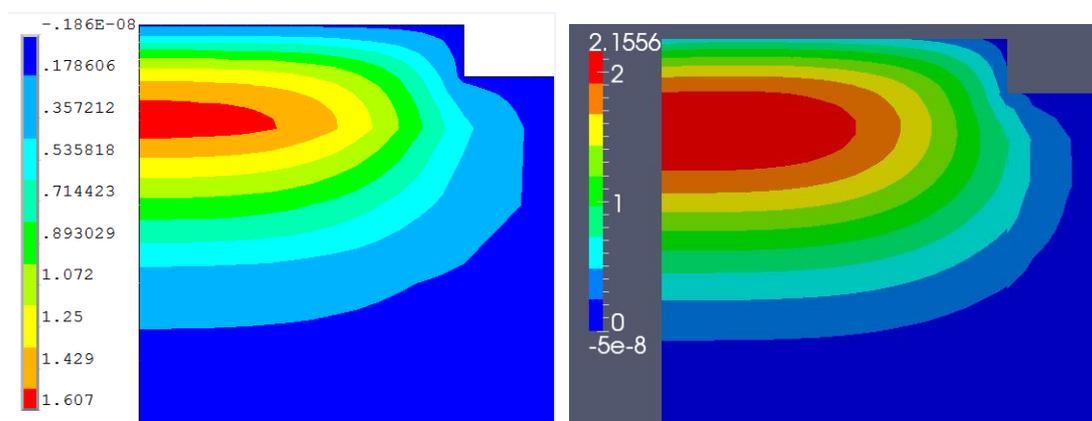
(a) 有限元 (b) 边界面法
图 3.4-13 2m 浇筑块温度场云图对比 (t=4d)



(a) 有限元 (b) 边界面法
图 3.4-14 2m 浇筑块温度场云图对比 (t=10d)



(a) 有限元 (b) 边界面法
图 3.4-15 2m 浇筑块温度场云图对比 (t=30d)



(a) 有限元 (b) 边界面法
图 3.4-16 2m 浇筑块温度场云图对比 (t=100d)

3.4.3 岩基上 3m 厚单层浇筑块温度计算

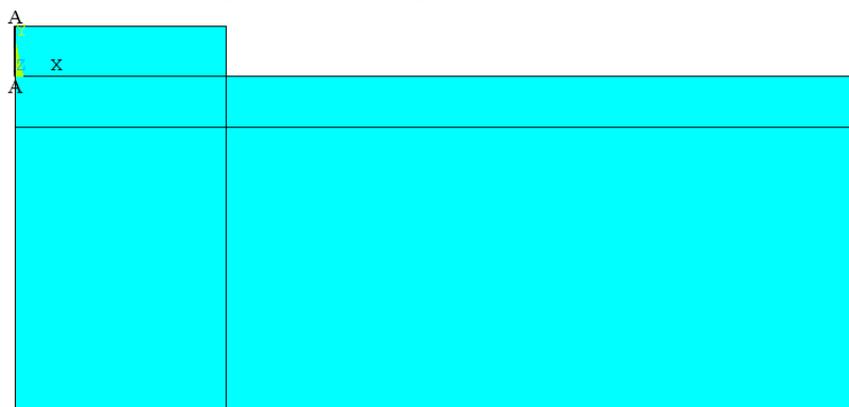


图 3.4-17 3m 厚单层浇筑块模型

1. 模型尺寸：如图 3.4-17 所示，浇筑层长 25m，厚 1m，基岩长 100m，高 20m。
2. 材料参数：导热系数： $\lambda = 10.0 \text{kJ}/(\text{M} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$ ，表面放热系数： $\beta = 60.0 \text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$ 。
3. 初始条件和边界条件：混凝土初温： $T_0 = 0^\circ\text{C}$ ，气温： $T_0 = 0^\circ\text{C}$ ，
4. 热源：混凝土绝热温升： $\theta(\tau) = 25.0\tau / (4.50 + \tau)$ ，基岩绝热温升： $\theta(\tau) = 0$ 。
5. 网格：

有限元软件 ANSYS 网格模型如图 3.4-18(a)所示：由于有限元计算中采用的是二维模型，因此网格采用四节点四边形单元，每一个面的 X 方向分为单元数 15，Y 方向分为单元数 6，共计 511 个节点，463 个单元，分析步长 0.5d。

边界面法计算中采用的网格模型如图 3.4-18(b)所示，面网格采用四边形八节

点单元, 共 1914 个单元, 6558 个节点。体网格采用六面体二十节点单元, 共 3480 个单元, 17665 个节点

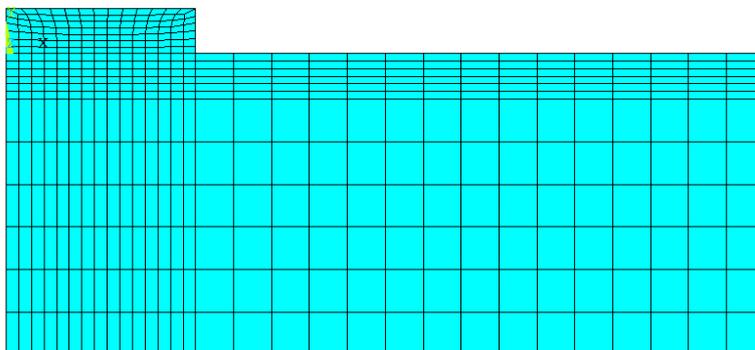


图 3.4-18(a) 有限元网格模型 (3m 厚单层浇筑块)

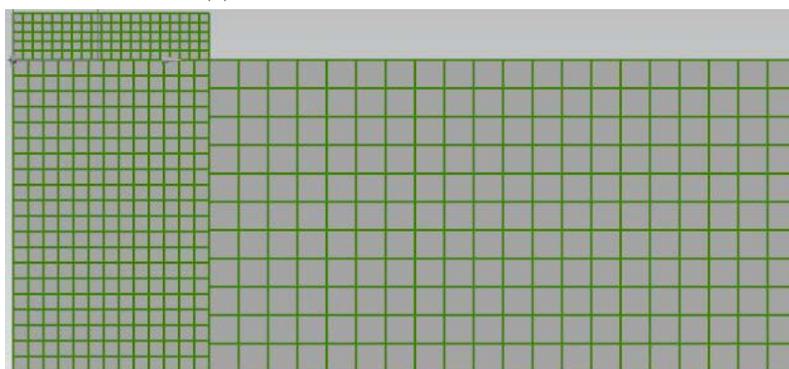
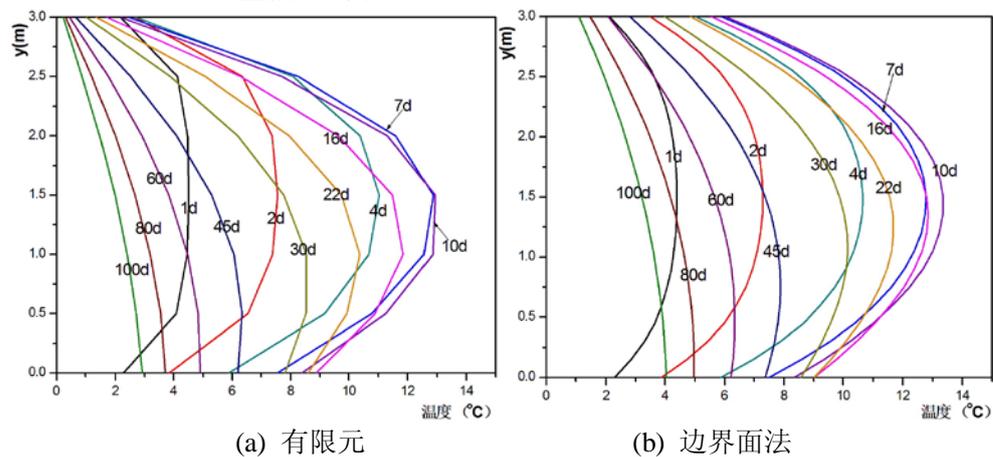


图 3.4-18(b) 边界面法网格模型 (3m 厚单层浇筑块)

选取图 3.4-17 中所示 A-A 截面上的各个节点进行结果输出, 做出 A-A 截面上的不同时间的温度分布如下:

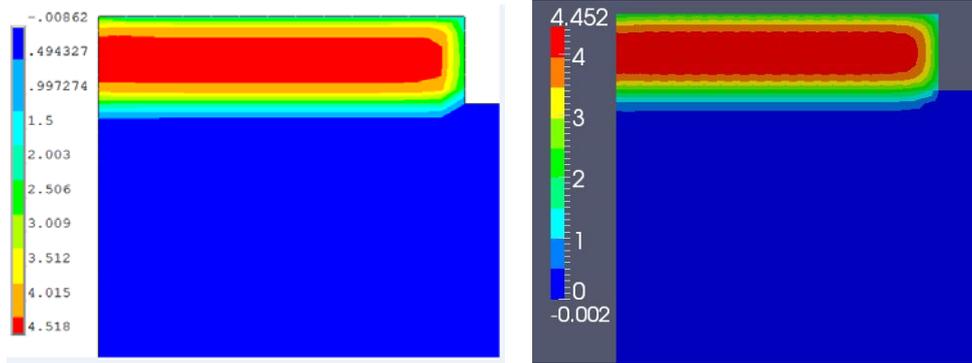


(a) 有限元

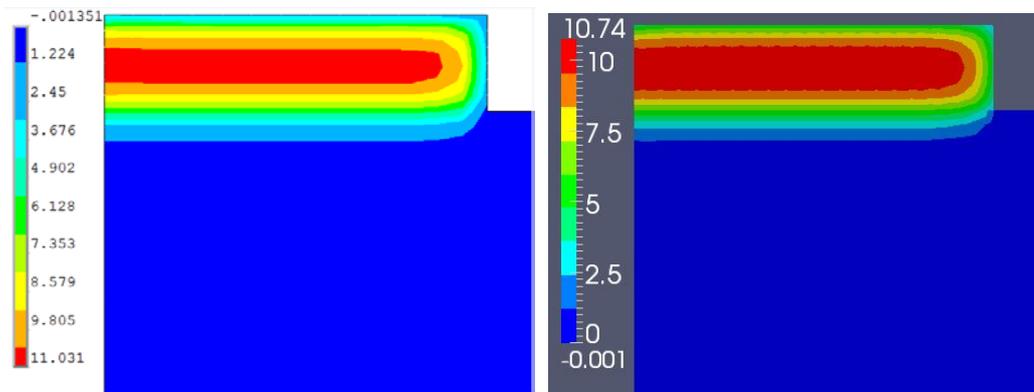
(b) 边界面法

图 3.4-19 3m 厚单层浇筑块 A-A 截面温度分布对比

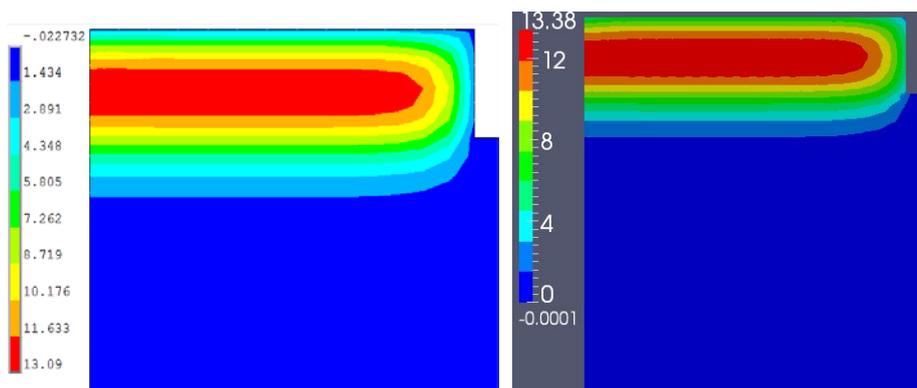
截取部分时间点的结果云图对比如下:



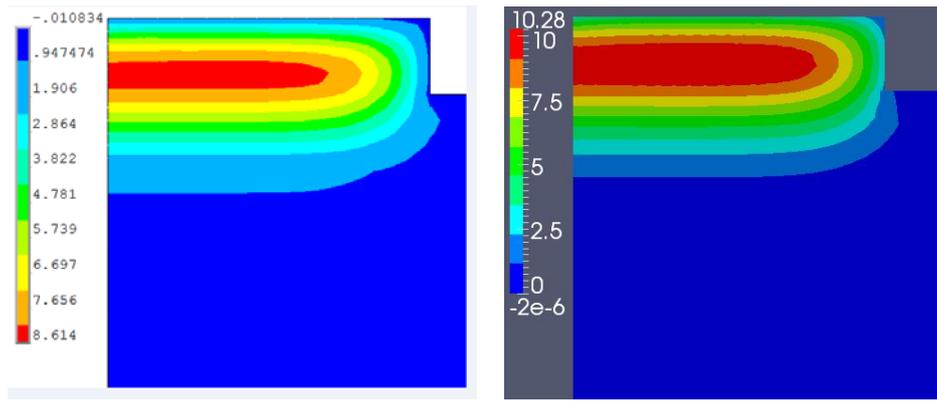
(a) 有限元 (b)边界面法
图 3.4-20 3m 浇筑块温度场云图对比 (t=1d)



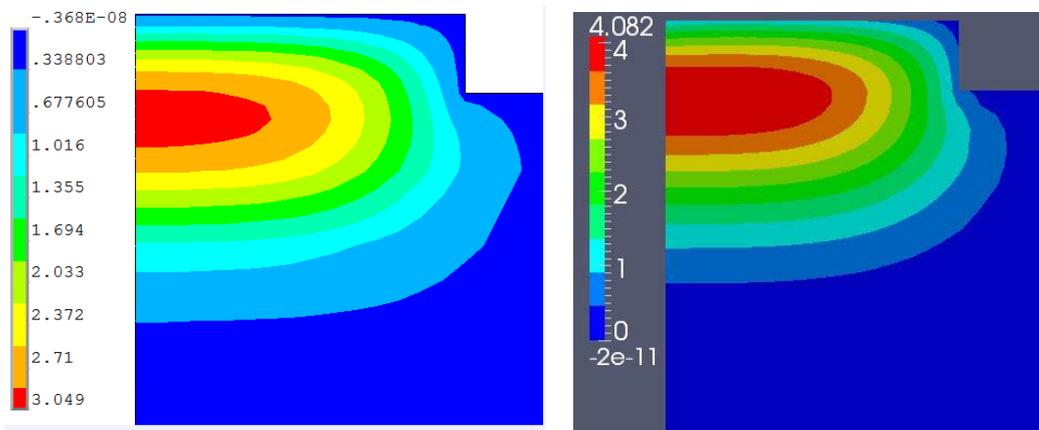
(a) 有限元 (b)边界面法
图 3.4-21 3m 浇筑块温度场云图对比 (t=4d)



(a) 有限元 (b)边界面法
图 3.4-22 3m 浇筑块温度场云图对比 (t=10d)



(a) 有限元 (b) 边界面法
图 3.4-23 3m 浇筑块温度场云图对比 (t=30d)



(a) 有限元 (b) 边界面法
图 3.4-24 3m 浇筑块温度场云图对比 (t=100d)

3.4.4 岩基上三层浇筑块温度计算

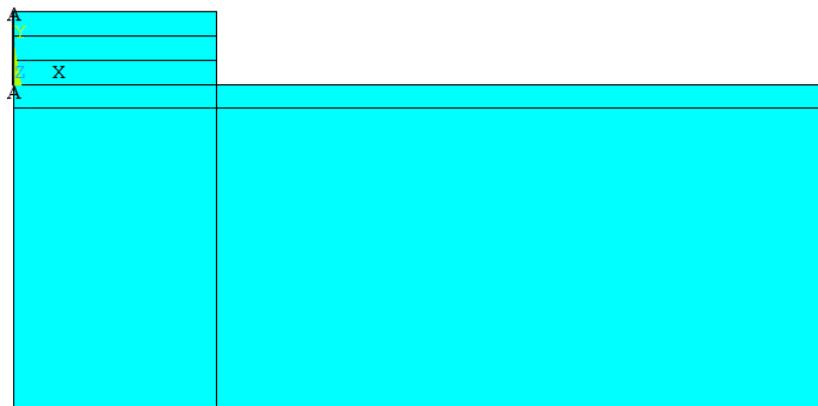


图 3.4-25 3 层浇筑块模型

1. 模型尺寸：如图 3.4-25 所示，浇筑层长 25m，厚 1m，基岩长 100m，高 20m。
2. 材料参数：导热系数： $\lambda = 10.0 \text{kJ}/(\text{M} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$ ，表面放热系数： $\beta = 60.0 \text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$ 。

3.初始条件和边界条件：混凝土初温： $T_0 = 0^{\circ}\text{C}$ ，气温： $T_0 = 0^{\circ}\text{C}$ ，层间间歇 7d。

4. 热源：混凝土绝热温升： $\theta(\tau) = 25.0\tau / (4.50 + \tau)$ ，基岩绝热温升： $\theta(\tau) = 0$ 。

5. 网格：

有限元软件 ANSYS 网格模型如图 3.4-26(a)所示：由于有限元计算中采用的是二维模型，因此网格采用四节点四边形单元，每一个面的 X 方向分为单元数 15，Y 方向分为单元数 6，共计 341 个节点，294 个单元，分析步长 $0.5d$ 。

边界面法计算中采用的网格模型如图 3.4-26(b)所示，面网格采用四边形八节点单元，共 2610 个单元，9114 个节点。体网格采用六面体二十节点单元，共 3600 个单元，19237 个节点。

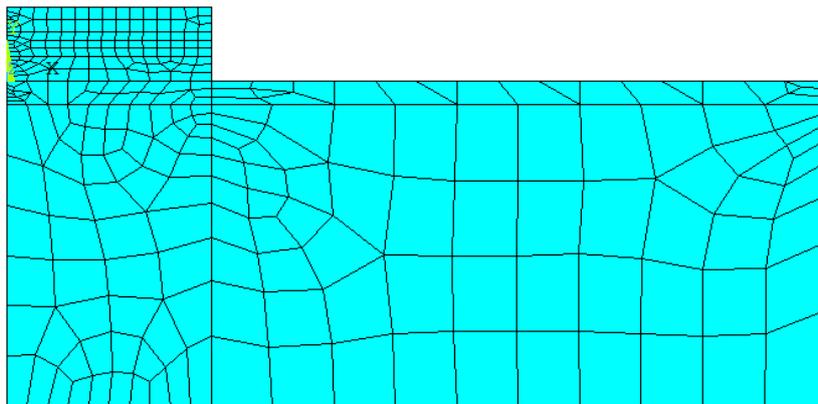


图 3.4-26(a) 有限元网格模型（3层浇筑块）

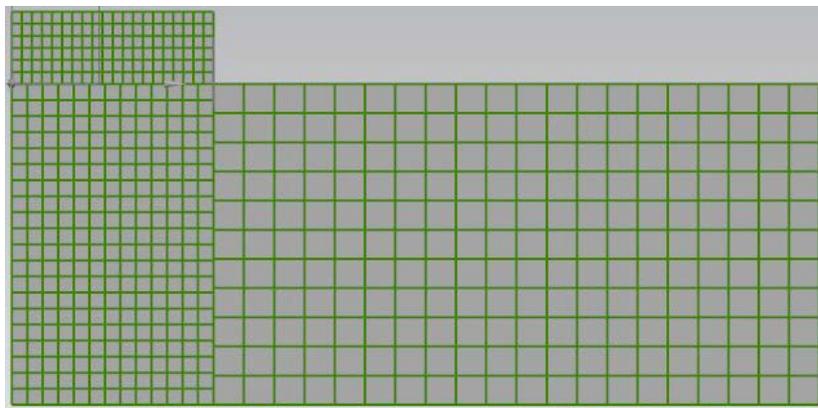
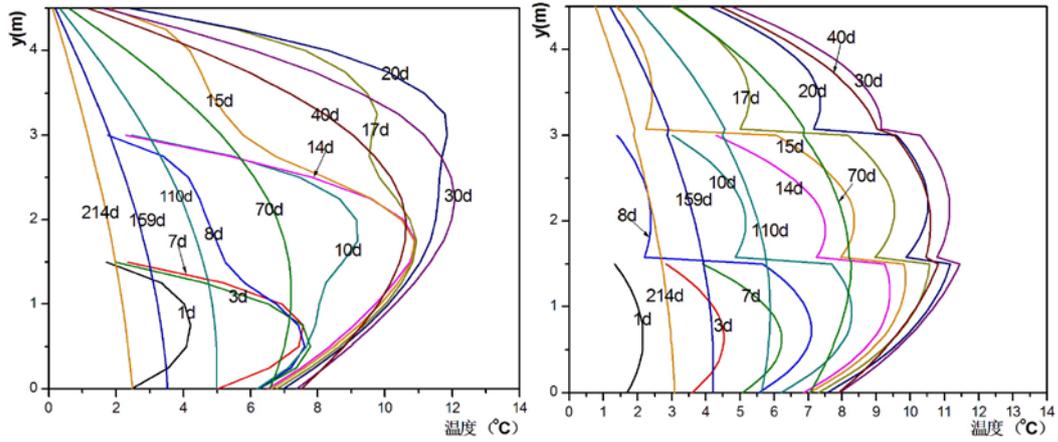


图 3.4-26(b) 边界面法网格模型（3层浇筑块）

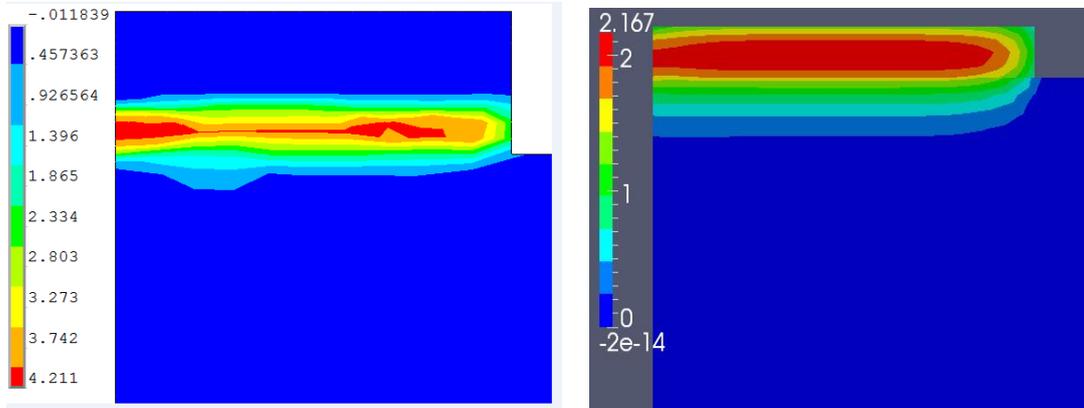
选取图 3.4-25 中所示 A-A 截面上的各个节点进行结果输出，做出 A-A 截面上的不同时间的温度分布如下：



(a) 有限元 (b) 边界面法

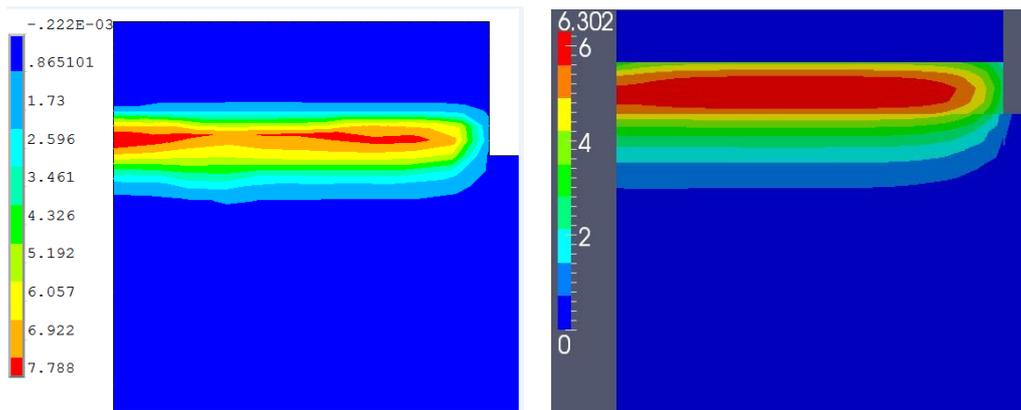
图 3.4-27 3层浇筑块计算结果

截取部分时间点的结果云图对比如下：



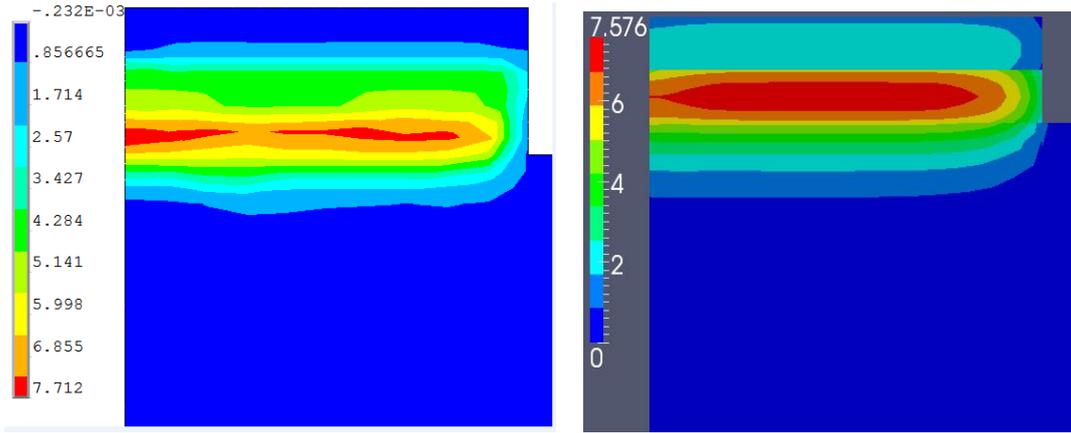
(a) 有限元 (b) 边界面法

图 3.4-28 3层浇筑块温度场云图对比 (t=1d)

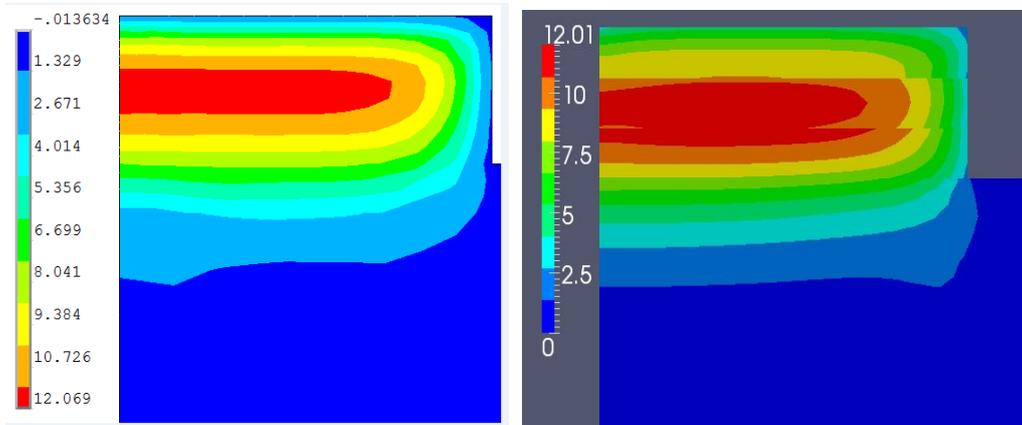


(a) 有限元 (b) 边界面法

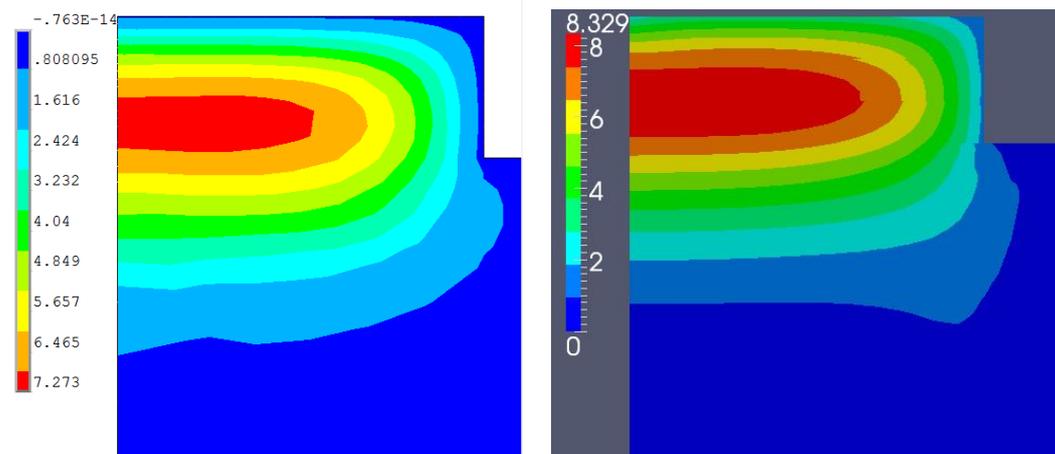
图 3.4-29 3层浇筑块温度场云图对比 (t=7d)



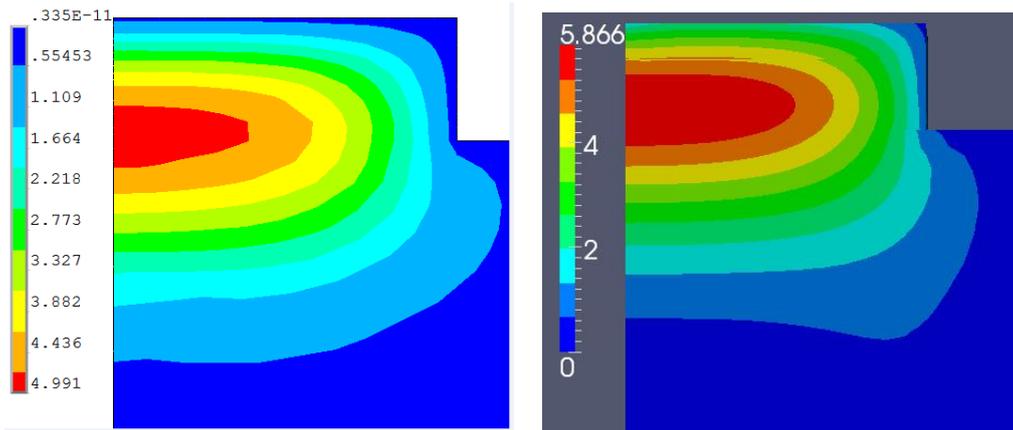
(a) 有限元 (b) 边界面法
图 3.4-30 3层浇筑块温度场云图对比 (t=8d)



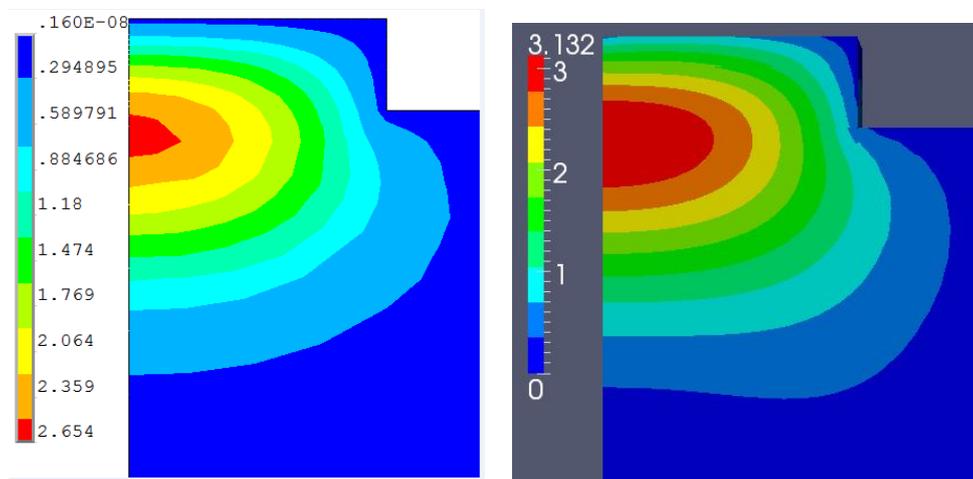
(a) 有限元 (b) 边界面法
图 3.4-32 3层浇筑块温度场云图对比 (t=30d)



(a) 有限元 (b) 边界面法
图 3.4-33 3层浇筑块温度场云图对比 (t=70d)



(a) 有限元 (b) 边界面法
图 3.4-34 3层浇筑块温度场云图对比 (t=110d)



(a) 有限元 (b) 边界面法
图 3.4-35 3层浇筑块温度场云图对比 (t=214d)

3.4.4 岩基上16层混凝土浇筑块的温度计算

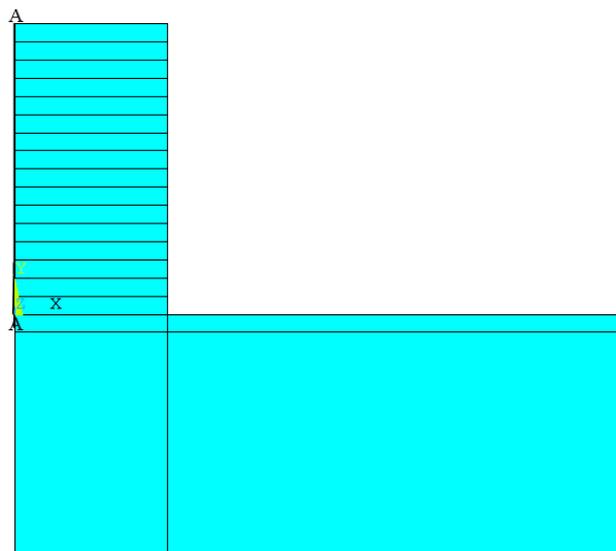


图 3.4-35 16 层浇筑块模型

1. 模型尺寸：如图 3.4-35 所示，浇筑层长 25m，厚 1m，基岩长 100m，高 20m。
2. 材料参数：导热系数： $\lambda = 10.0 \text{kJ}/(\text{M} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$ ，表面放热系数： $\beta = 60.0 \text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$ 。
3. 初始条件和边界条件：混凝土初温： $T_0 = 0^\circ\text{C}$ ，气温： $T_0 = 0^\circ\text{C}$ ，层间间歇 10d。
4. 热源：混凝土绝热温升： $\theta(\tau) = 25.0\tau / (4.50 + \tau)$ ，基岩绝热温升： $\theta(\tau) = 0$ 。
5. 网格：

有限元软件 ANSYS 网格模型如图 3.4-36(a)所示：由于有限元计算中采用的是二维模型，因此网格采用四节点四边形单元，每一个面的 X 方向分为单元数 15，Y 方向分为单元数 6，共计 3769 个节点，3600 个单元，分析步长 0.5d。

边界面法计算中采用的网格模型如图 3.4-36(b)所示，面网格采用四边形八节点单元，共 14139 个单元，47967 个节点。体网格采用六面体二十节点单元，共 14480 个单元，81290 个节点

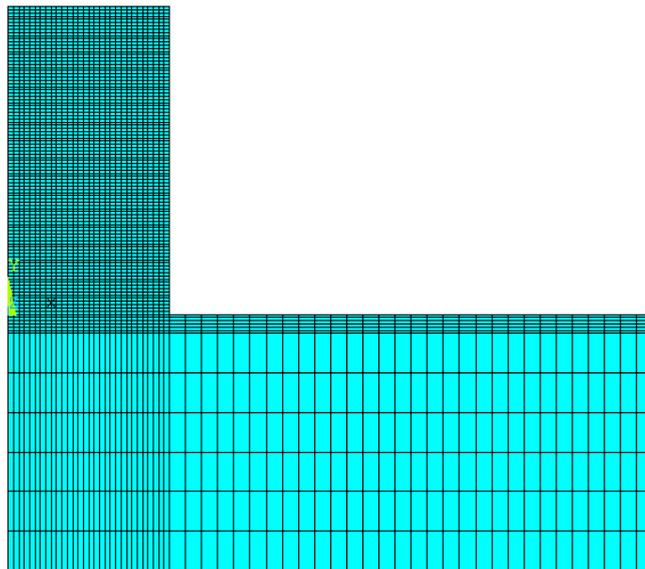


图 3.4-36(a) 有限元网格模型(16 层浇筑块)

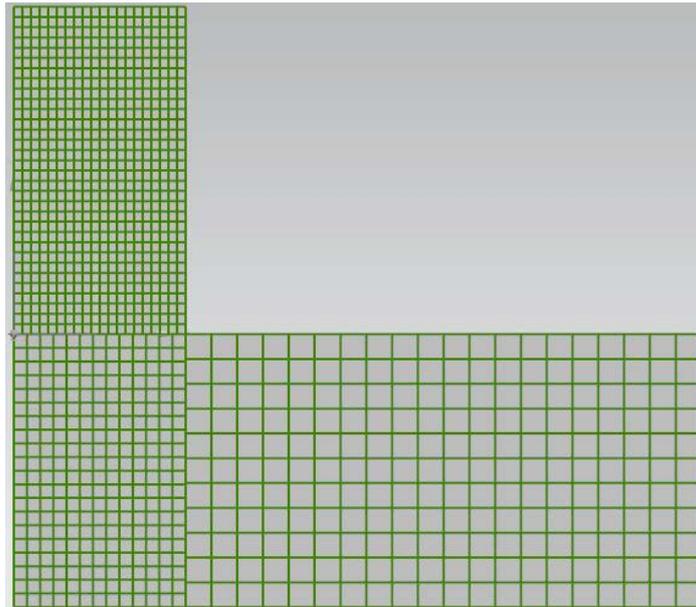
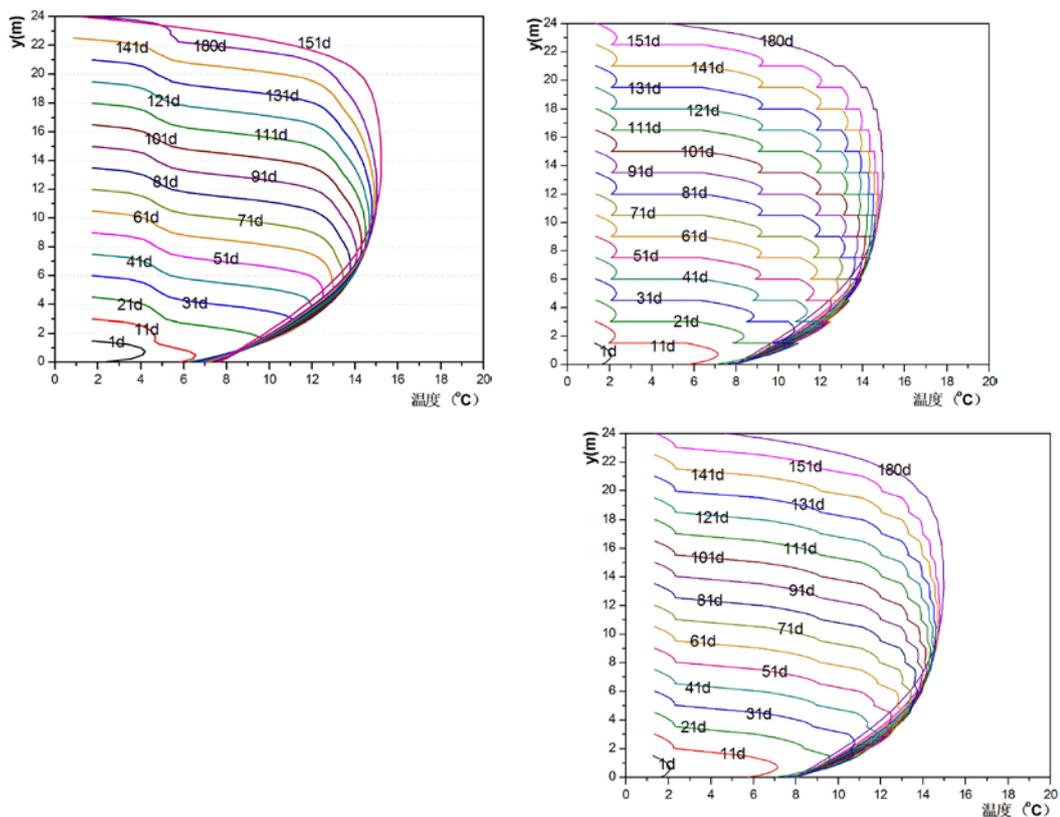


图 3.4-36(b) 边界面法网格模型（16 层浇筑块）

选取图 3.4-35 中所示 A-A 截面上的各个节点进行结果输出，做出 A-A 截面上的不同时间的温度分布如下：

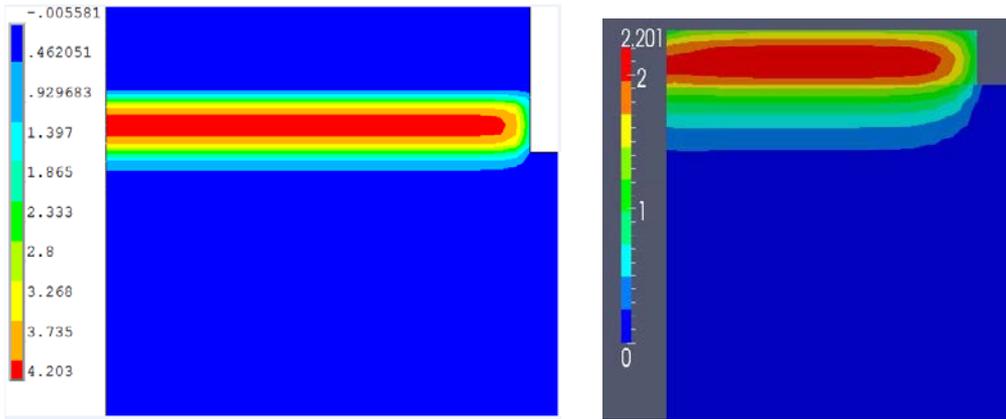


(a) 有限元(步长 1d)

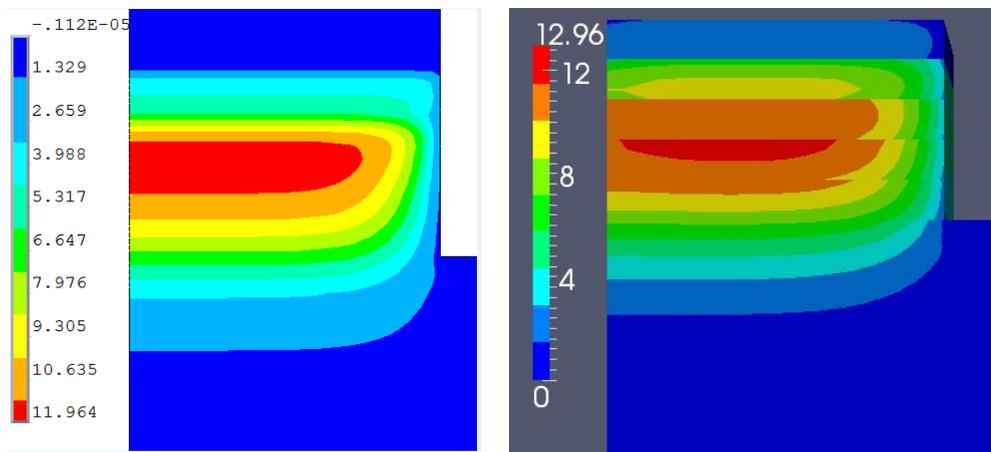
(b) 边界面法(非均匀步长)

图 3.4-37 16 层浇筑块温度分布对比

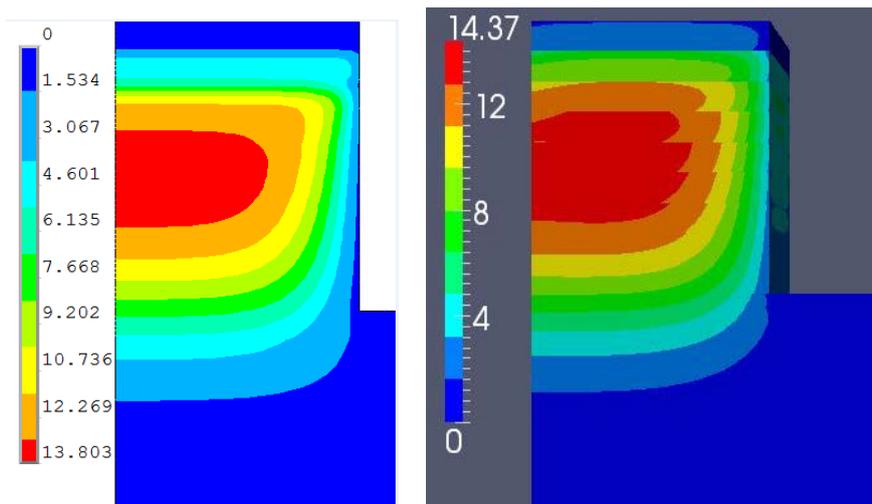
截取部分时间点的结果云图对比如下：



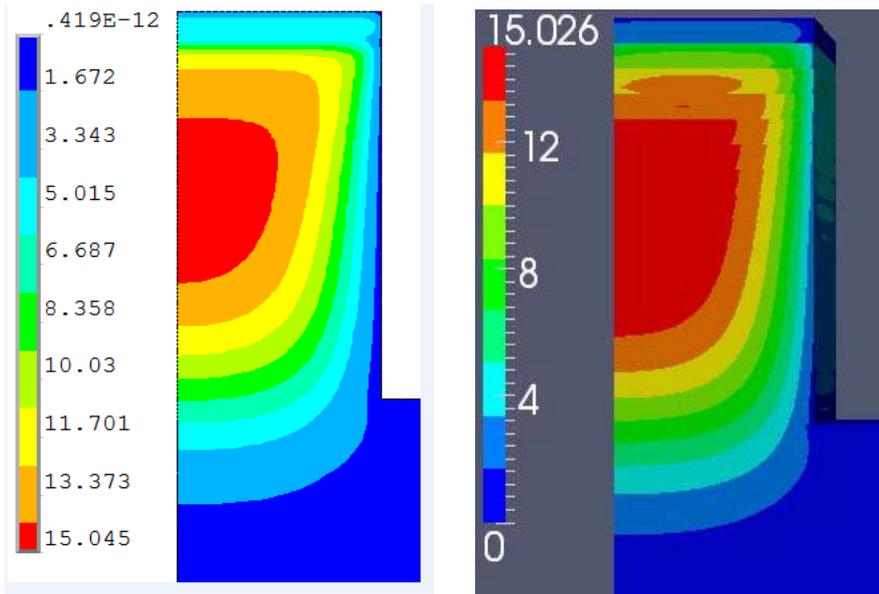
(a) 有限元 (b) 边界面法
图 3.4-38 16层大坝温度场云图对比 (t=1d)



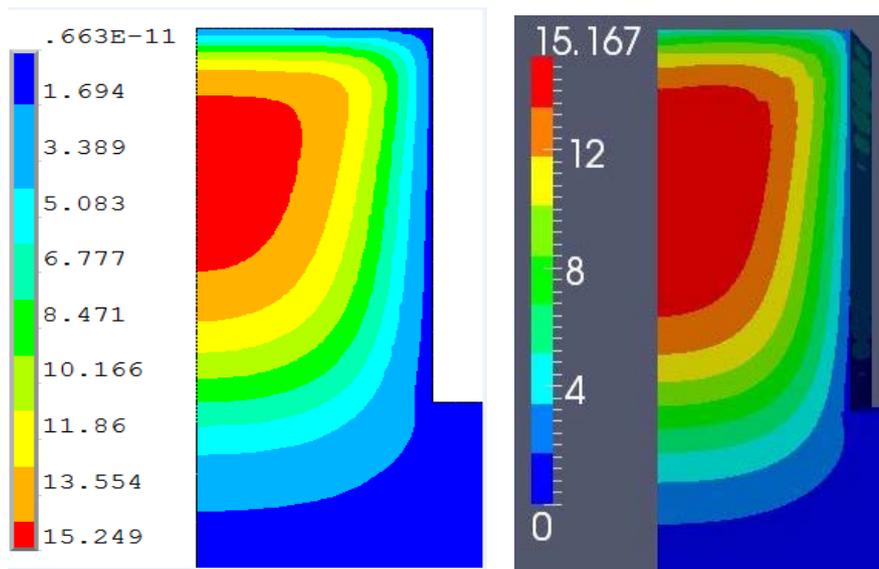
(a) 有限元 (b) 边界面法
图 3.4-39 16层大坝温度场云图对比 (t=41d)



(a)有限元 (b) 边界面法
图 3.4-40 16层大坝温度场云图对比 (t=81d)



(a) 有限元 (b) 边界面法
图 3.4-42 16 层大坝温度场云图对比 (t=151d)



(a) 有限元 (b) 边界面法
图 3.4-41 16 层大坝温度场云图对比 (t=180d)

四、带有水管的大坝三维网格划分

带有水管的大坝，其水管直径与块体的边长相比尺寸是很小的。如果用传统方法离散成四面体，网格数目会很大。为了解决这一问题，我们采用扫掠法和 delaunay 方法，生成四面体与六面体的混合格网，将网格数目降低了一个量级。不含管道的块体，则生成六面体网格。

大坝的三维网格实例如下：

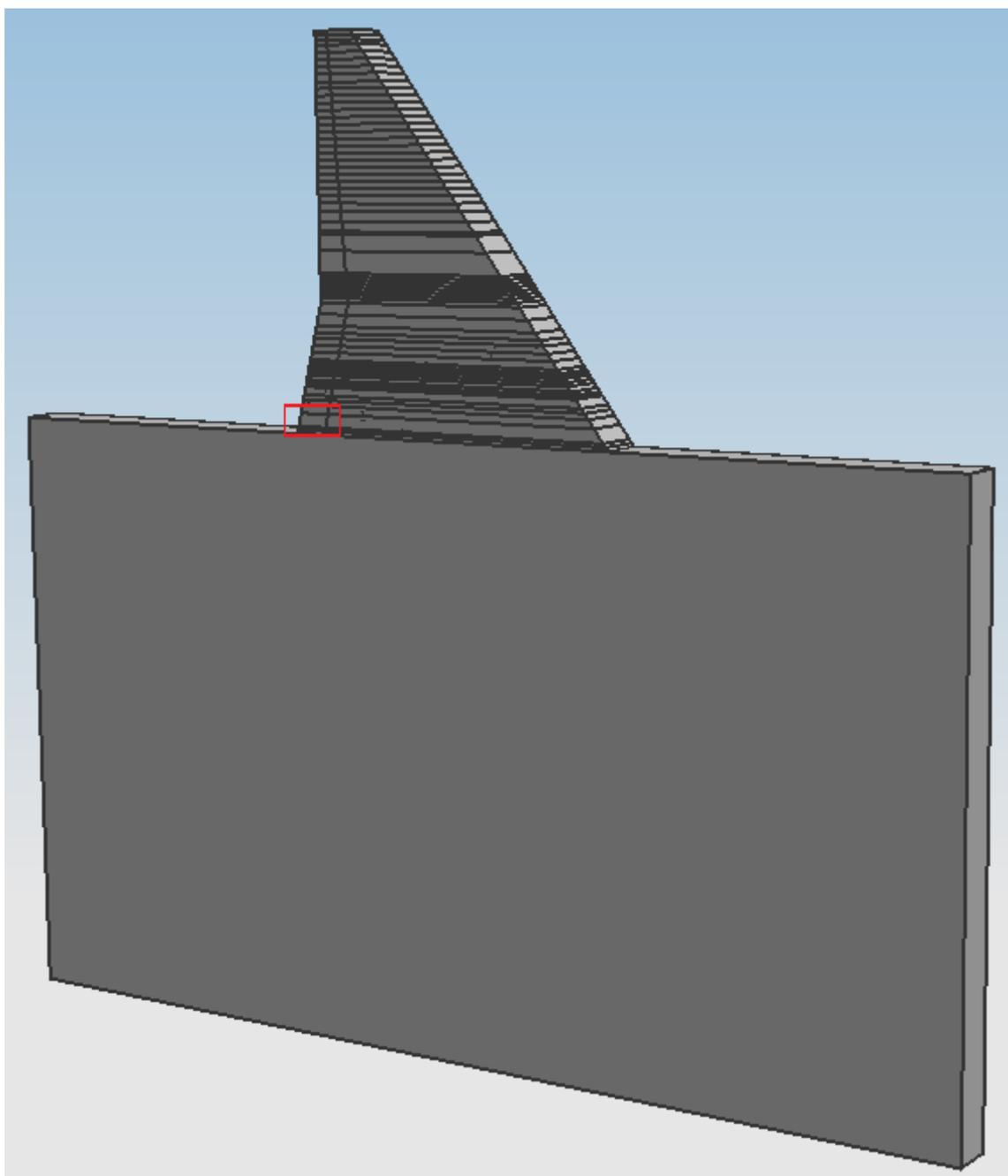


图 4.1 含有管道的大坝模型

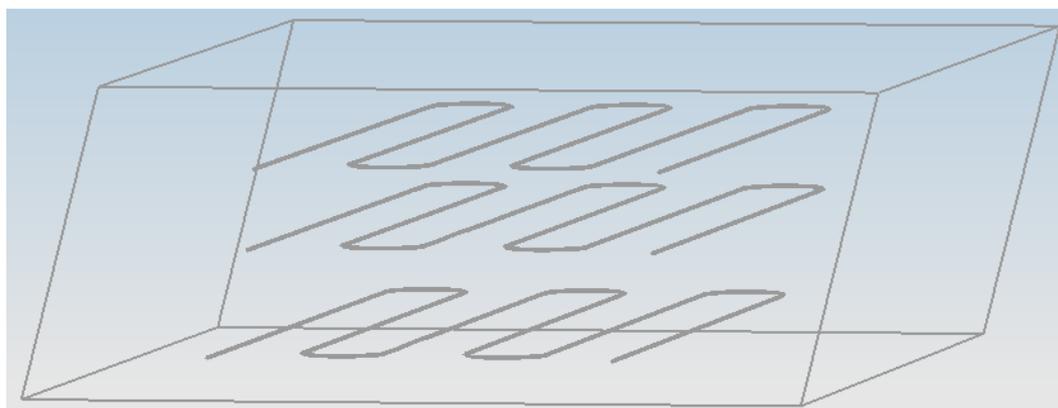


图 4.2 上图中红色方框所示块体

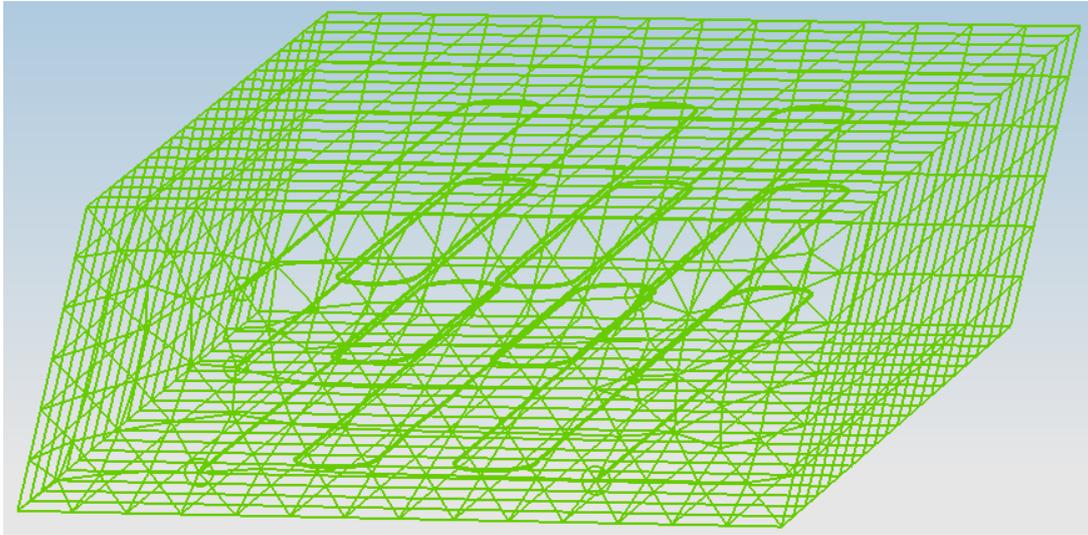


图 4.3 含有管道块体二维计算网格

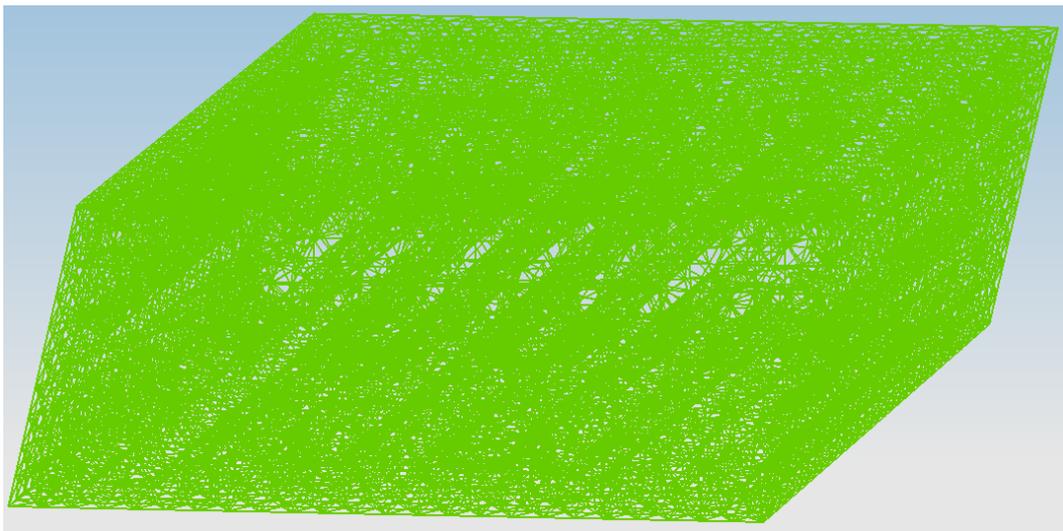


图 4.4 含有管道块体三维代表网格

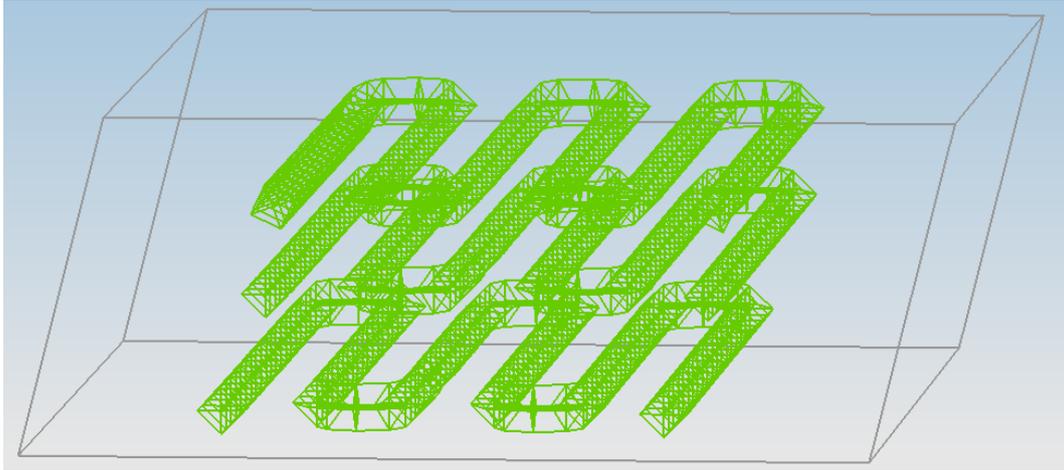


图 4.5 含有管道块体三维代表网格中围绕管道的六面体网格