

基于 ANSYS 的冷却水与混凝土对流换热模拟研究

燕 乔, 张 胜利

(三峡大学 水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002)

摘要:在混凝土冷却水管温控计算中,实现热流耦合算法的关键是准确模拟混凝土与冷却水之间的对流换热,以往的计算都是通过将混凝土在水管处节点与同一位置的流体单元附加节点逐一耦合来实现的,即 CP 方法,该方法需要逐一耦合节点,在大规模数值模拟中较为麻烦。为此,首先分析了 CP 方法模拟的本质,即先通过耦合使混凝土节点与流体单元附加节点温度一致,同时利用流体单元主节点与附加节点之间具有对流换热这一特性来实现对流换热过程的模拟。基于此,提出了另外两种模拟冷却水与混凝土之间对流换热的方法,即 CPINTF 和 NUMMRG 方法。通过一实例的对比分析,验证了以上两种方法的准确性。通过进一步分析得出,NUMMRG 方法为最优方法。

关 键 词:热流耦合算法;模拟;对流换热;CPINTF;NUMMRG

中图法分类号:TV431

文献标志码:A

DOI:10.16232/j.cnki.1001-4179.2015.05.011

在大体积混凝土内部预埋冷却水管通水降低混凝土温度是一种有效的温控措施。工程上广泛用于计算含有冷却水管的大体积混凝土温度场的方法是朱伯芳提出的“等效算法”^[1]。该算法是在平均意义上考虑水的冷却作用,并将其视作负热源。该方法能方便且准确地计算混凝土的平均温度,但是不能精细模拟水管处的混凝土温度,也不能考虑冷却水的沿程温升,与实际情况不符,因此有必要研究水管冷却的精细模拟方法。为此,刘宁和刘光廷提出了水管冷却效应的有限元子结构模拟技术^[2];朱岳明等在用有限单元迭代算法近似求解的基础上,根据水管与混凝土之间的热流交换平衡原理,提出了一种数学上完全严密的新算法^[3];朱伯芳院士提出了水管冷却仿真计算的复合算法^[4];闫慧玉提出了热流耦合算法^[5]。

相较于子结构法^[2]、数学上完全严密的新算法^[3]以及复合算法^[4]等需要在水管处细化网格,热流耦合算法不需要在水管处细化网格,网格划分简单、方便。相较于等效算法,热流耦合算法又可以精细模拟水管处混凝土的温度,并能考虑冷却水的沿程温升。但是热流耦合算法需要通过逐一耦合流体单元 fluid116 的附加节点与同一位置的混凝土节点来模拟混凝土与冷

却水之间的对流换热,比较麻烦。本文通过对 ANSYS 软件中若干命令的对比分析,指出了热流耦合算法模拟冷却水与混凝土之间对流换热的本质,在此基础上提出了两种可以模拟冷却水与混凝土之间的对流换热的方法,并从中进一步选出了最优方法。

1 热流耦合算法

热流耦合算法方程主要包括混凝土内部的热传导方程、流体内部的传热微分方程、初始条件以及边界条件。混凝土热传导微分方程^[1]为

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{\partial \theta}{\partial \tau} \quad (1)$$

式中, T 为混凝土温度; τ 为时间; a 为混凝土导温系数; x, y, z 为坐标; θ 为混凝土绝热温升。

假设冷却水管的管内流体为一维定常流,管内流体的温度为 $T = T(s, t)$,则混凝土内部的一维流体与混凝土之间的热交换,即管内流体的传热微分方程^[5]为

$$\frac{\partial m}{\partial \tau} c \frac{\partial T_f}{\partial s} + \Gamma h_f (T_f - T_s) = 0, T(0, t) = t_{\text{int}} \quad (2)$$

式中, $\frac{\partial m}{\partial t}$ 为管道内流体质量的流速; c 为比热; T_f 为

混凝土周围流体温度; s 为流线坐标; h_f 为对流换热系数; T_s 为混凝土表面温度; t_{in} 为管道入口处流体温度。初始条件为混凝土初始温度以及水管内流体初始温度。

边界条件除了包括混凝土与周围空气以及混凝土与管内流体的第 3 类边界条件,即 $-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \beta(T - T_a)$, 其中, λ 为混凝土导热系数, T 为混凝土表面温度, n 为混凝土表面法线方向, β 为混凝土表面放热系数, T_a 为空气温度或流体温度;还包括水管入口处流体温度的第 1 类边界条件,即水管入口处流体温度已知。

2 ANSYS 中的几个命令^[6]

(1) CP, NSET, Lab, NODE1, ..., NODE17。耦合两个或两个以上节点的自由度,即让两个或两个以上节点的自由度保持同一值,对于混凝土温度场来说,自由度即为温度。耦合集中的第一自由度为主自由度。除非是主自由度,否则不能在耦合集中指定自由度约束。

(2) CPINTF, Lab, TOLER。耦合两个或两个以上“重合”的节点的自由度,ANSYS 中默认的是距离在 0.000 1(包括本数)之内的节点都算作重合。

(3) NUMMRG, Label, TOLER, GTOLER, Action, Switch。合并距离在 1×10^{-4} 以内的节点和关键点。合并之后,同一位置的混凝土节点与流体单元的附加节点将为同一点,因此它们的温度必然相同。

3 对流换热的模拟方法

由 CP 命令可知,耦合混凝土节点与同一位置的流体单元附加节点的实质,就是使混凝土在水管处节点的温度与流体单元附加节点的温度相同,由于流体单元主节点与附加节点之间可以进行对流换热,因而就模拟了混凝土与冷却水之间的对流换热。由此可知,模拟冷却水与混凝土之间的对流换热的关键是如何使混凝土在水管处节点的温度与流体单元 fluid116 附加节点的温度一致。这可通过 CPINTF 和 NUMMRG 命令来实现。

对于 CP 方法,如图 1 所示^[7],该方法必须逐一耦合同一位置的混凝土节点与流体单元的附加节点,这对于含有众多冷却水管的大体积混凝土而言,工作量是极其繁杂与庞大的。

图 1 中 I 、 J 为流体单元 fluid116 的主节点, K 、 L 为附加节点。流体单元 1 中 K_1 节点、 L_1 节点以及混凝土对应节点是重合的,即坐标相同。 L_1 节点、 J_1 节点以

及混凝土对应节点也是重合的,流体单元 2 的 K_2 节点与流体单元 1 的 L_1 节点为同一节点,流体单元 2 的 I_2 节点与流体单元 1 的 J_1 节点也为同一节点。

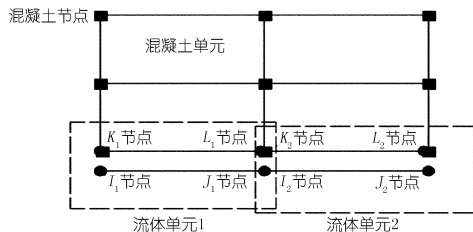


图 1 热流耦合有限元模型

对于 CPINTF 方法,是通过耦合流体单元 fluid116 的附加节点与同一位置的混凝土节点来模拟冷却水与混凝土之间的对流换热的。由 CPINTF 命令可知,只需要在建立流体单元时,使流体单元的主节点与附加节点之间的距离大于 0.000 1(本文取 0.002,即图 1 中 I_1 与 K_1 的距离为 0.002),并在划分混凝土实体单元时使混凝土在水管处的节点与流体单元的附加节点重合,即坐标相同(图 1 中 K_1 节点与混凝土对应节点还是重合的),即可通过命令 CPINTF, temp 来耦合所有的同一位置的混凝土节点与流体单元附加节点。

NUMMRG 方法,是通过使混凝土节点与同一位置的流体单元附加节点为同一点来模拟冷却水与混凝土之间的对流换热。由命令 NUMMRG 的含义可知,其有限元模型与 CPINTF 方法的有限元模型相同,有限元模型建立后,通过执行 NUMMRG, ALL 命令即可模拟冷却水与混凝土之间的对流换热。

4 3 种模拟方法建模过程对比

在模拟混凝土浇筑的过程中,当浇筑第一层混凝土时,需要约束未浇筑的其他层混凝土节点自由度,即约束其温度为浇筑温度。而 CP 命令只允许在主自由度节点上施加自由度约束,因此,将混凝土在水管处的节点与同一位置的流体单元附加节点相耦合时,应把混凝土节点放在第一位,即将 NODE1 作为混凝土节点。CPINTF 命令本质上也是将混凝土在水管处的节点与同一位置的流体单元附加节点耦合起来。该命令耦合时,是把编号小的节点放在第一位的,因此,必须先建立混凝土单元,然后再建立 4 节点流体单元。而对于 NUMMRG 命令,则没有任何限制和要求。因此,运用 NUMMRG 方法是最方便简单的。

5 实例分析

5.1 基本资料及计算结果

计算模型为某混凝土重力坝基础强约束区的 4 个

浇筑层,浇筑层顺河向长为 30 m,横河向长为 16 m,高度为 3 m。计算范围包括建基面以下 12 m 厚基岩,并向上游取 30 m,向下游取 30 m,有限元模型如图 2 所示。每个浇筑层埋设两层水管,一层布置在底面上,另一层布置在浇筑层中间,水管间距为 1.5 m×1.5 m,水管进水口温度为 8℃,水的流量为 1.5 m³/h,每天变换一次水流方向。混凝土浇筑温度为 12℃,混凝土表面放热系数为 47.1 kJ/(m²·h·℃),间歇期为 7 d。混凝土上下游面及侧面采用 1.5 cm 厚泡沫板保温,仓面为一层土工膜保温,1.5 cm 厚泡沫板的等效放热系数为 183 kJ/(m²·d·℃),土工膜的等效放热系数为 320 kJ/(m²·d·℃)。浇筑期间外界气温为 21℃,基岩初始温度 16℃。冷却水、水管以及混凝土热学参数见表 1,计算时间为 28 d。计算结果见图 3~5。

表 1 混凝土、水及冷却水管热力学参数

材料	密度/ (kg·m ⁻³)	导热系数/ [kJ·(m·h·℃) ⁻¹]	比热/ [kJ·(kg·℃) ⁻¹]	绝热温升/ ℃
水	1000	2.16	4.186	
混凝土	2475	8.41	1.01	26.6
冷却水管	1050	6.1	1.4	

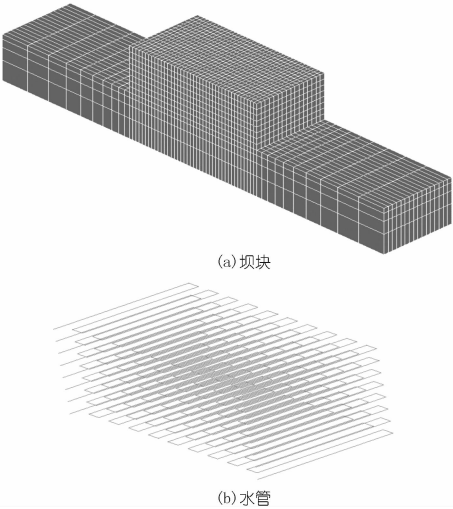


图 2 坝块有限元模型及水管模型

5.2 计算结果分析

由图 3 可知,28 d 时 CPINTF 方法与 CP 方法计算出的混凝土最高温度都为 31.539℃,而且两者混凝土温度场完全一样,说明相对于 CP 方法,CPINTF 方法中使流体单元主节点偏移 0.002 m 做法对计算结果毫无影响。

由图 3 和图 4 对比可知,28 d 时,NUMMRG 方法计算出的混凝土最高温度为 30.454℃,与 CP 方法的相比,两者绝对差为 1.085℃,相对差为 3.4%,相差很小。

由图 5 可知,NUMMRG 方法与 CP 方法计算出的

中心某点的最大温度差出现在 28 d,为 1.5℃,相对于 CP 方法的 19.1℃,相对差为 7.8%,相差也比较小,而且两者的温度变化趋势基本一致。

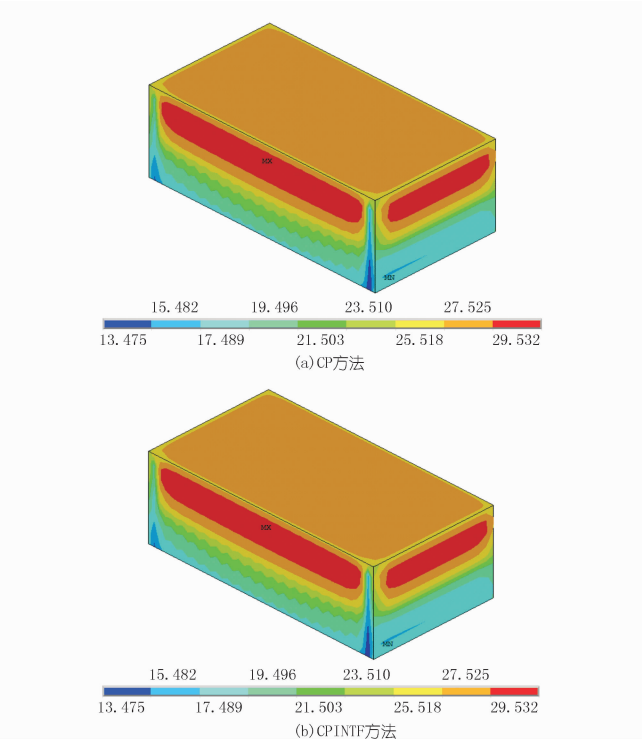


图 3 CP 方法与 CPINTF 方法 28 d 时混凝土温度场(℃)

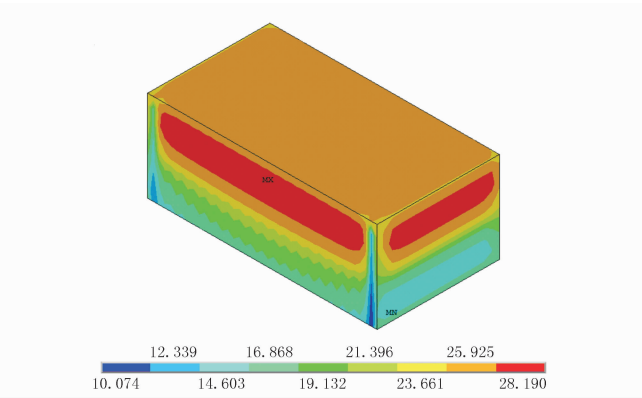


图 4 NUMMRG 方法 28 d 时混凝土温度场(℃)

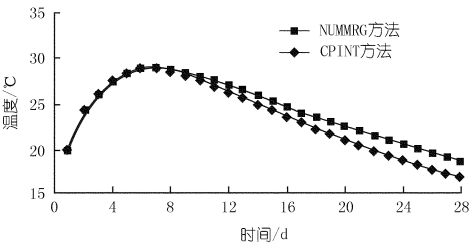


图 5 NUMMRG 方法与 CP 方法第一层中心点温度曲线

综上所述,NUMMRG 方法与 CP 方法的计算结果很接近,结果准确、可信,将 NUMMRG 方法用于计算

含有冷却水管的大体积混凝土温度场是可行的。

6 结 论

(1) CPINTF 方法与 CP 方法本质上是一致的,即都通过耦合来模拟冷却水与混凝土之间的对流换热。相对于 CP 方法,CPINTF 方法耦合过程简单,只需要将模型建好后,执行 CPINTF, TEMP 命令即可耦合所有的混凝土在水管处的节点与同一位置的流体单元附加节点。

(2) NUMMRG 方法的计算结果与 CP 方法的计算结果相差很小,表明该方法计算结果可信。在模拟混凝土浇筑过程方面,相对于 CP 和 CPINTF 方法,NUMMRG 方法建模更简单。因此,NUMMRG 方法对于模拟冷却水与混凝土之间的对流换热最具优势。

参考文献:

[1] 朱伯芳. 大体积混凝土温度应力与温度控制[M]. 北京:中国水利水电出版社,2012:23-24.

[2] 刘宁,刘光廷. 水管冷却效应的有限元结构模拟技术[J]. 水利学报,1997,(12):43-49.

[3] 朱岳明,徐之青,贺金仁,等. 混凝土水管冷却温度场的计算方法[J]. 长江科学院院报,2003,20(2):19-22.

[4] 朱伯芳. 混凝土坝水管冷却仿真计算的复合算法[J]. 水利水电技术,2003,34(11):47-50.

[5] 闫慧玉. 大体积混凝土温度场水管冷却热流耦合仿真方法研究[D]. 武汉:武汉大学,2005.

[6] 王泽鹏. ANSYS 12.0 热力学有限元分析从入门到精通[M]. 北京:机械工业出版社,2010:53-60.

[7] 段寅,向正林,常晓林,等. 大体积混凝土水管冷却热流耦合算法与等效算法对比分析[J]. 武汉大学学报:工学版,2010,43(6):703-707.

(编辑:郑 毅)

Simulation study of convective heat transfer effect between cooling water and concrete in ANSYS

YAN Qiao, ZHANG Shengli

(College of Hydraulic and Environment Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: The key of the thermal - fluid coupling algorithm in temperature - control calculation of mass concrete is to simulate the convective heat transfer between the cooling water and concrete accurately. Previous simulation of convective heat transfer was realized by coupling fluid element additional nodes with the concrete nodes in the same place of pipe, namely the CP - Method. This method needs coupling nodes one by one, which was inconvenient in large - scaled simulation analysis. On this basis, we point out that the essence of CP - Method is to make the temperature at fluid element additional nodes equal to the concrete nodes in the same place and utilize the characteristic of convective heat transfer between fluid element master nodes and additional nodes. Therefore, we propose other two methods of simulating the convective heat transfer, the CPINTF - Method and NUMMRG - Method, and the rationality of the two methods is verified by a practical example. Further analysis shows that the NUMMRG - Method is the optimal one.

Key words: thermal - fluid coupling method; simulation; convective heat transfer; CPINTF; NUMMRG



(上接第 49 页)

Local scour calculation method of power transmission line tower in sea influenced by jointed affect of wave and tide

LI Lei, GU Hongqin, YU Wanchun

(State Nuclear Electric Power Planning Design & Research Institute, Beijing 100095, China)

Abstract: Influenced by the jointed affect of wave and tide, the local scour problem of power transmission tower in the sea is complicated. 4 local scour calculation formulas (Han Haiqian's Formula, Wang Rukai's Formula, J&S Formula, 65 - 1 modified formula and 65 - 2 formula) applied in the local scour calculation are compared and analyzed. For the formula only considering the wave effect, the velocity of wave particle and the velocity of tidal current are superposed together. For the formula considering the reciprocating flow effect of tide, the reduction coefficient is used to correct the calculated value. The 4 calculation formulas are applied to a tower of power transmission line in sea, and the results show that the Han Haiqian's Formula is the most consistent with the practical condition.

Key words: local scour; wave; tide; tower in sea