文章编号：1002-0268（2004）03-0064-03

隧道管片生产阶段防裂措施及温度场数值模拟

孙宗军[1]，刘松玉[1]，吴京荣[1]，陈新华[2]
（1. 东南大学，江苏 南京 210096；2 山东建工集团，山东 济南 250014）

摘要：防水是地下结构的关键问题，而隧道管片是地下防水的最后一道防线，必须在生产阶段进行防裂。对某地铁隧道衬砌管片生产养护过程中出现的裂缝进行分析，提出解决方案，在现场对衬砌管片的标准块做防裂试验，用有限元方法模拟试验瞬态温度场，与实测的部分点的温度进行对比，效果吻合较好，说明用一定温度的水对高温管片进行内外温差控制可以控制裂缝的产生，不仅为建立准确的温控提供数值保障，也为后续的温度场与结构裂缝分析的耦合计算奠定基础。

关键词：地铁管片；裂缝；有限元；温度场；瞬态
中图分类号：U451.4 文献标识码：A

Measures Taken to Guard Against Crack of Tunnel Segments in Production Phase and Numeral Simulation of Thermal Field

SUN Zong-jun[1]，*LIU Song-yu*[1]，*WU Jing-rong*[1]，*CHEN Xin-hua*[2]
（1. Southeast University, Jiangsu Nanjing 210096, China;
2 Corporation of Architectural Engineering of Shandong, Shandong Jinan 250014, China）

Abstract: Waterproof is main problem of underground engineering. Tunnel segment is the most important defence to water. The crack must be controlled strictly. And the crack of tunnel liner segment in the process of production and protection is analyzed. A practical project is designed to solve the problem and transient temperature finite element method is used to simulate the project. And it is compared with measured temperature in situ. The result is accepted. Theorical guarantee is etabilished to form accurate temperature control. This method to control the difference between core and surface concrete temperature is effective to avoid the crack. Waterproof problem of underground engineering will be well assured. And it is used to calculate thermal and structural couple.

Key words: Tunnel segment; Crack; Finite element; Temperature field; Transient temperature

0 引言

地铁在国内修建的越来越多，当前主要精力集中在结构设计和施工方面，已经取得了显著的成果。衬砌管片的防裂，尤其在生产过程中出现的温度裂缝，不能简单的利用补浆涂抹来处理，应该分析裂缝产生的原因，建立有效的温度控制措施来尽量避免。目前国内关于地下工程的温控研究工作开展甚少，而且温控要求也较松，而地铁管片的温控研究更少，本文对防裂措施和温度场的分布状况加以研究，希望能够建立一套完善的自动控温措施。

混凝土管片是地铁结构的重要部分，管片的质量好坏直接影响到地铁的防水和结构安全。地铁管片暴露在地下，而且周围经常富含地下水，裂缝的存在对于地铁的安全运营是很大的威胁，尤其是地下条件复杂，承受荷载不易估计（如突如其来的地震），在混凝土水化热逐渐发生形成的非线性温度场作用下，在制作过程中产生的裂缝向纵深发展，形成较大的深层

收稿日期：2003-02-18
作者简介：孙宗军（1976—），男，山东胶南人，博士研究生，主要从事地下结构与岩土工程的研究.

裂缝。裂缝产生的原因主要因素是温度应力（包括温降和内外温差），其次自身体积变形和干缩也是不可忽略的因素。在地铁以后的实际运营中，裂缝部分将是应力集中区域，这些裂缝破坏了结构的整体性，改变了设计安排的应力分布图形，从而有使局部甚至整体结构发生破坏的可能。即使是一般的表面裂缝对混凝土管片的持久性，地铁管片在地下的复杂受力和温度应力迭加，对整个结构的应力状态在运行阶段具有不可忽视的影响，所以温控设计与结构设计具有同等重要的意义。管片在制作现场如果不能有效的控制由于温度产生的裂缝，隐患将由此潜在。这种生产过程中的裂缝研究引起生产厂家及现场技术人员的日益重视。本文针对某地铁管片厂在实际制作工程中出现的具体问题提出防治措施，在混凝土管片制作养护阶段就要采取措施对混凝土管片与外界直接接触的表面进行防裂处理，并对地铁衬砌管片的标准块防裂装置的实际温度进行了现场测试和温度场的数值模拟。

1　未经防裂温度设计的管片开裂现象

隧道管片的制作流程是先在振捣模具里浇注振捣成型，然后进行有温度严格控制的蒸汽养护，达到60℃后，从蒸气养护模具里高温取出，直接暴露在空气中，核心混凝土的温度达到60℃，养护车间的温度25℃，在入水池养护前的几个小时里，管片表面出现了大面积的裂缝，而且有些纵向也出现了裂缝。管片的裂缝分布中，以管片内径居多，以边角分布较多。这种现象在秋冬季节温度更低的情况下更为明显。本来养护的目的是使混凝土保持或尽可能接近于饱和状态，使水化作用达到其最大的速度，得到更高强度的混凝土，不同的养护和维护可使结构的抗裂能力成倍变化。而且夏天浇注的混凝土比冬天浇注的混凝土强度要低。如果混凝土潮湿状态低于相对湿度的80%，干燥状态比湿养护状态强度显著降低，并且干缩很容易引起较大面积的微裂缝，尤其要注意的是在干燥状态下对混凝土抗拉强度的影响更为敏感，在温度应力的作用下，超过此时较小的抗拉强度，就出现了结构裂缝，尤其是沿管片厚度方向上的裂缝。这就是未经防裂温度控制的管片开裂现象。

2　解决措施

为了防止和控制温度裂缝的发生，混凝土的养护工作十分重要。裂缝的产生主要是因为刚从蒸汽养护模具里拿出，温度较高，而直接暴露在空气中，而混凝土是热的不良导体，内部的高温与表面的低温差异过大，从核心到表面的温度梯度过大，从而引起了较大的温度应力，也就是中间的干燥状态这段时间要采取措施，既要保证一定的湿度，又要控制温度梯度。实际上有条件的话完全可以在大养护池里加入适宜温度的水，既可以保持湿度，又可以使混凝土内部避免过陡的温度梯度。但在实际大规模的管片生产中，尤其是室外条件下，较难实现。本文采取了制作铁皮水箱，通过有控制的温水既保证混凝土有利于养护的潮湿状态，又能使核心混凝土，尤其是表明的温度梯度比较平缓，不会产生过大的温度应力，从而避免了裂缝的产生。对地铁衬砌管片中的标准块（径向1.2m）进行了实验，标准块放在铁皮箱内，混凝土块与铁皮之间灌满了初始温度为48℃的水。

图1是具体的防裂设计图，温水层100mm，外面的空气层取200mm，并在弧形铁箱的最顶端沿径向30mm，60mm，90mm开孔，分别插入温度计测量混凝土壁温和水温。分别测出从蒸养模具取出开始算起的1h，2h，3h，4h的温度。靠近铁皮的空气温度（在管片顶部，对应于测水温和混凝土壁温的位置）直接测出。

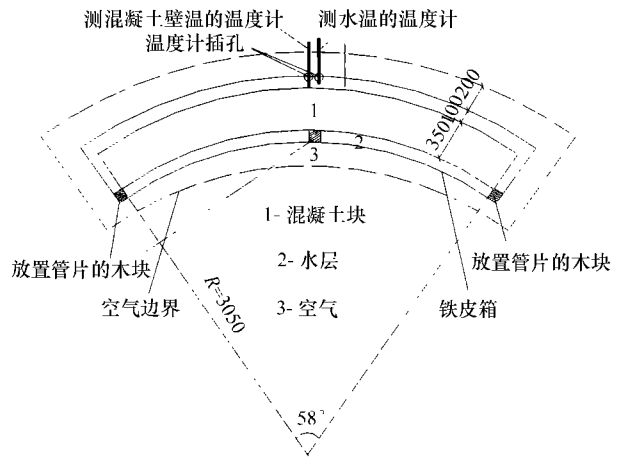

图1　管片防裂温控设计及温度量测图（单位mm）

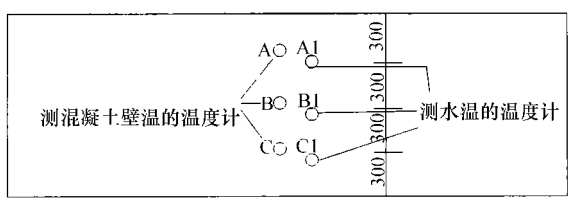

图2　径向温度计布置图（单位mm）

标准块的尺寸为管片厚350mm，这个防裂措施完全可以推广为在厂房现场做成一个个的保温养护池（室），通过精确的温控来避免制作管片中产生的裂缝，确保管片在进入衬砌时的带裂缝工作。通过现场量测（限于量测设备，只量测了混凝土壁、水层和铁

皮外空气的温度）和温度场的有限元模拟，对比可见效果较好。至于温度场和结构应力的耦合计算在另一篇文章中阐述，本文只介绍温度场量测及模拟部分。

温度测试结果　　表 1

时间	混凝土壁温（℃）				水温（℃）				空气温度（℃）			
(h)	A	B	C	平均	A1	B1	C1	平均	A	B	C	平均
1	51.0	53.1	51.1	52.0	26.5	29.2	27.3	27.6	20.3	21.5	20.4	20.7
2	48.9	52.5	49.5	50.3	35.1	38.5	37.6	37.1	26.5	28.9	26.7	27.4
3	48.2	49.1	48.4	48.6	37.5	40.3	38.6	38.8	29.0	31.2	29.6	30.0
4	47.5	48.2	47.1	47.6	41.0	43.1	39.5	41.2	30.5	33.2	31.5	31.7

由于测试仪器和现场条件的限制，本文选择了以上几个易测和具有一定代表性的点，与有限元计算的对应点结果进行对比，以验证其准确性。

3　有限元模拟温度场分析

3.1　传热过程确定

瞬态热分析[1]用于计算一个系统的随时间变化的温度场及其它热参数。在工程上一般用瞬态热分析计算温度场，并将之作为热载荷进行应力分析。

对于地铁衬砌管片在蒸养后放置在室温条件下的自然降温，由于温度梯度过大而产生裂缝。我们采取控制一定温度的水在混凝土表面形成对流降温，水通过铁皮与空气辐射热量，整个过程是一个瞬态热分析过程。

瞬态传热过程是指一个系统的加热或冷却过程。在这个过程中系统的温度、热流率、热边界条件以及系统内能随时间都有明显变化。根据能量守恒原理，瞬态热平衡可以表达为（以矩阵形式表示）

$$[C]\ \{T^{\&}\} + [K]\ \{T\} = \{Q\}$$

式中，$[K]$ 为传导矩阵，包含导热系数、对流系数及辐射率和形状系数；$[C]$ 为比热矩阵，考虑系统内能的增加；$\{T\}$ 为节点温度向量；$\{T^{\&}\}$ 为温度对时间的导数；$\{Q\}$ 为节点热流率向量，包含热生成。

在管片防裂装置中，有三种热传递方式。在核心管片混凝土内部主要以热传导的方式进行；在水层内部主要以对流为主，热传导为辅；在空气层主要以对流为主。

3.2　初始条件和边界条件分析

在初始瞬时，混凝土、水层、铁皮及空气层的初始温度都已确定。混凝土初始温度为 54 ℃，水层初始温度为 48 ℃，铁皮初始温度 16 ℃，空气初始温度为 16 ℃。

混凝土与水接触时，混凝土的导热系数 λ＝8～12kJ/（m·h·℃），混凝土与水接触时放热系数表面温度等于已知的水温，放热系数 λ＝8 000～1 600kJ/（m^2·h·℃），虚厚度 λ/β＝0.5～1.0mm，所以混凝土表面温度等于水温。

铁皮与空气接触时，假定经过铁皮表面的热流量与铁皮表面温度 T 和气温 T_a 之差成正比，即

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \beta\ (T - T_a)$$

式中，β 为表面放热系数，kJ/（m^2·h·℃）。

β 与铁皮本身的材料性质无关，而决定与固体表面的粗糙度，流体的导热系数、粘滞系数、流速及流向等。这里取 18.46kJ/（m^2·h·℃）。因为铁皮与空气的接触为迅速的温度变化，其虚拟厚度去 1.2m 已够。

对流发生在混凝土-水界面和铁皮-空气界面。前者的初始边界条件为水 48 ℃，对流换热系数为 7.88W/m^2·℃；后者的初始边界条件为空气 16 ℃，对流换热系数为 252.2W/m^2·℃。

3.3　材料参数（见表 2、表 3、表 4）

混凝土配合比　　表 2

	水泥	砂	石子	水	总计
重量（kg）	441	725	1134	150	2450
百分比（%）	18	30	46	6	100

混凝土热性能参数　　表 3

	32℃	43 ℃	54 ℃
导热系数 kJ/（m·h·℃）	10.815	10.700	10.598
比热 kJ/（kg·℃）	0.966	1.018	1.089

其他物理参数　　表 4

	ρ（kg/m^3）	λ（w/m·℃）	c（kJ/kg·℃）
水	1000	0.6	4.187
空气	1.17	0.026	1.177

本文的温度场非线性有限元计算考虑了不同温度下的传热系数，可以更为准确的模拟混凝土在整个传热过程的导热情况。

3.4　非线性温度场分析

这是对处理标准块建立的模型。其中核心面积为混凝土部分，中间一层为水层，最外层是空气层。具体尺寸与图 1 所示的尺寸一致。单元类型采用二维热固体单元 plane55，该单元为 4 节点四边形单元，共划分单元 2707 个，节点 2794 个。计算出瞬态温度场不同时刻分布等值线图。

从 1～4h 的等值线计算结果可以比较直观的看出温度场随时间的变化过程，而且温度变化与形状有一定的关系，在尖角附近尤其要注意。（下转第70页）

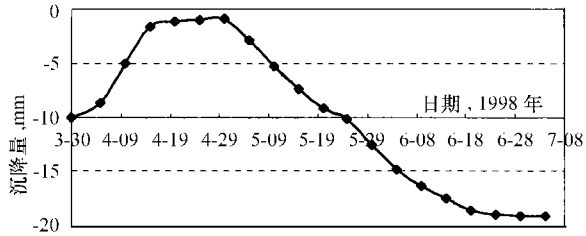

图 **2**　地表沉降监测曲线

结帷幕交圈并达到设计厚度止）变化曲线见图 3，卸压孔的最大压力是在帷幕交圈后达到 0.41MPa，较结构所受到的水土压力要大，卸压孔压力上升是冻土冻胀发展的结果。通过释放压力，压力维持在 0.11MPa，小于开冻前的压力(0.25MPa)，这也说明冻结帷幕是封闭完整的。通过这种工程措施，上行线隧道管片向隧道内侧水平移动量为 0.34mm，竖直向下位移量为 5mm，满足了隧道的轴线标高质量要求。

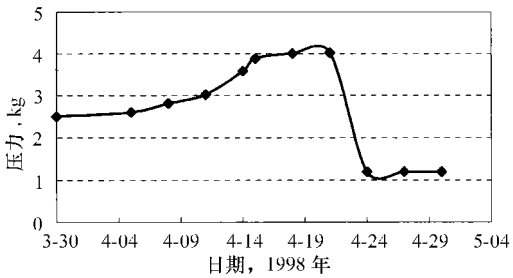

图 **3**　卸压孔压力变化曲线

7　结论

以人工地层冻结技术为例，探讨了岩土工程建设活动与环境之间紧密联系和相互作用。

（1）认识冻土的冻胀机理及影响因素，采取合理的措施减小冻胀量对环境的影响，如地下管线、地表沉降和相邻建筑物等。

（2）冻胀力是外环境（结构物、衬砌）约束冻土冻胀产生的作用力。在施工时要充分考虑冻胀力的不利影响，并采取措施加以克服。

（3）融沉处理也是冻结法施工中必须关注的一道工序。对地表、结构的后期变形有一定的影响。融沉常用注浆充填法来处理。

（4）随着现代岩土工程新技术的发展和人们环境意识的不断提高，必须认识到岩土工程活动与环境是统一的整体，并运用岩土工程的观点、方法去优化环境问题，这也是人类工程建设活动的目的。

参考文献：

[1]　徐学祖，等. 冻土物理学 [M] . 科学出版社，2001.
[2]　朱选举. 冻土中未冻水迁移规律研究 [D] . 清华大学硕士学位论文，2000.
[3]　周健，吴世明，徐建平. 环境与岩土工程 [M] . 中国建筑工业出版社，2001.

（上接第 66 页）

有限元模拟结果　　表 **5**

	1h	2h	3h	4h
核心混凝土温度（℃）	53.45	52.219	51.03	49.968
边角处混凝土温度（℃）	42.92	40.794	39.745	39.229
测量处混凝土温度（℃）	50.9	48.4	47.9	47.2

比较一下实际测量处混凝土的温度：52.0，50.3，48.6，47.6 与上表的“测量处混凝土温度”误差可以接受，模拟结果吻合较好。

4　结论及建议

本文针对隧道衬砌管片在生产养护过程中出现的裂缝，结合实际设计防裂装置，经试验有效的解决了裂缝的产生，便于指导管片的生产。同时进行了瞬态温度场的有限元模拟，可以建立瞬时温控，为后续的热-结构的耦合分析提供数值保障。本文主要得到以下结论：

（1）潮湿状态的保持

管片在生产过程中，从蒸气养护模具里高温取出，直接暴露在空气中，这是原来的生产工艺的主要弊端，裂缝的产生在室温更低时将更为明显，潮湿状态的保持尤其重要，本文设计的水层解决了这方面的要求。在实际生产过程中，除了本文设计的方案，可以用同样的变更方法，如在大养护池通入蒸气。

（2）一定温度的水

除了潮湿状态外，水温设计是防裂装置的重要一环。本文用进行设计方案的瞬态温度场的有限元模拟，并与实测的部分点的温度进行对比，效果吻合较好，为水温控制设计提供数值保障，也为后续的温度场与结构裂缝分析的耦合计算奠定基础。

参考文献：

[1]　[美] D 皮茨. 传热学 [M] . 科学出版社，2002.
[2]　王铁梦. 工程结构裂缝控制 [M] . 中国建筑工业出版社，1997.
[3]　朱伯芳. 大体积混凝土温度应力与温度控制 [M] . 中国电力出版社，1999.