

Hunningtu Jiegou De Wendu
Yingli Fenxi

混凝土结构的温度应力分析

刘 兴 法 著

人民交通出版社

内 容 简 介

本书系统地论述了混凝土工程结构，在自然环境温度变化作用下的计算理论与方法。内容包括：混凝土工程结构的日照温度变化荷载、骤然降温温度变化荷载的分析；各种工程结构在温度变化荷载作用下的温度应力分析等。此外还论述了与混凝土结构温度应力有关的几个重要问题。本书具有计算分析简明、实用性较强等特点。

为便于读者掌握书中的基本理论与计算方法，本书还列举了几种典型工程结构的计算实例。

本书可供从事工程结构设计、施工和科研的技术人员参考，亦可供高等院校桥梁、工业与民用建筑、公路工程等专业的师生参考。

目 录

前言

第一章	绪论	1
§1-1	概述.....	1
§1-2	混凝土结构的温差应力特点.....	8
第二章	温度分布与温度荷载	10
§2-1	概述.....	10
§2-2	温度荷载的分类、形成与特点.....	10
§2-3	混凝土的热物理特性.....	13
§2-4	混凝土结构的温度分布与温度荷载.....	16
§2-5	温度荷载分析.....	22
§2-6	国内外设计标准中有关温度荷载的规定.....	53
§2-7	几种典型混凝土结构的温度荷载与计算图式...	61
第三章	混凝土桥梁结构的温差应力	72
§3-1	概述.....	72
§3-2	T形和Π形桥梁的温度荷载与温差应力.....	73
§3-3	箱形桥梁的温度荷载与温差应力.....	78
§3-4	计算实例.....	98
§3-5	关于横向应力简化计算与精确计算的比较.....	120
第四章	桥墩和烟囱等工程结构的温差应力	129
§4-1	概述.....	129
§4-2	壁板式柔性墩.....	130
§4-3	箱形桥墩和其它类似建筑结构.....	143

§4-4	圆形筒体结构·····	161
§4-5	算例·····	180
第五章	公路水泥混凝土路面温差应力·····	195
§5-1	概述·····	195
§5-2	混凝土路面结构的温差荷载·····	195
§5-3	混凝土路面结构的温差应力·····	197
§5-4	关于路面结构温差荷载研究的建议·····	202
第六章	混凝土结构温差应力的几个问题·····	203
§6-1	概述·····	203
§6-2	混凝土弹性模量·····	203
§6-3	混凝土的水化热·····	206
§6-4	裂缝与温差应力·····	210
§6-5	混凝土的塑性变形·····	212
§6-6	温差荷载的反复作用·····	213
§6-7	温差荷载的组合·····	214
参考文献·····		215

第一章 绪 论

§ 1-1 概 述

一、混凝土结构的用途与发展

混凝土作为一种建筑材料问世以来，迄今已有一百多年历史。它是现代最重要的工程结构材料之一。而预应力钢筋是改进混凝土结构性能，提高工程结构质量的有效手段。由于混凝土结构具有许多优越性能，例如易于加工成型、能耗低、耐久性好、与钢材结合可以组成各类不同特性的承重结构，并适宜于大规模生产和施工工业化，所以应用普遍。因此，混凝土结构已成为现代不可缺少的，将来越来越广泛使用的一种工程结构物。国内外专家认为在进入21世纪之后，混凝土结构的应用将更为普遍。

目前全世界每年人均混凝土用量约为 $1.6 \times 10^3 \text{kg}$ 。我国混凝土年产量虽已超过 $1 \times 10^8 \text{m}^3$ ，但人均用量仅为 250kg ，与世界水平差距较大。根据目前与今后可能的发展速度，到2000年，预计我国混凝土用量每年将可达到 $5 \times 10^8 \text{m}^3$ 。近年来，混凝土的应用有较大发展，从一般工业与民用建筑结构、公路与铁路桥梁、轨枕、电杆、桩、压力管道、油罐与水塔等方面扩大到高层建筑、地下建筑、海洋结构、核电站防护壳与压力容器、大跨度空间结构与高耸塔桅结构等等。

二、混凝土结构的温度效应

置于自然环境中的混凝土结构，长期经受自然界气温的变化和日辐射等剧烈作用。此外有的结构物还经受人造的温度变化的作用，如核电站反应堆防护壳结构、高烟囱、贮料筒体结构等。由于混凝土结构的热传导性能差，其周围环境气温以及日辐射等作用，将使表面温度迅速上升（降低），但结构的内部温度仍处于原来状态，在混凝土结构中形成较大的温度梯度，混凝土结构的各部分处于不同温度状态。由此产生的温度变形，当被结构的内、外约束阻碍时，会产生相当大的温差应力。在桥梁结构中，由于这种温度荷载产生的应力，有时甚至比荷载产生的应力还要大，有的预应力混凝土桥梁因此发生严重裂损，给桥梁结构带来危害。因此，几十年来，温度应力问题一直是混凝土工程结构中的一个重大课题。

三、温度应力对混凝土结构的影响

50年代起，国内外学者从对桥墩裂缝的现场调查分析中，认识到温度应力对混凝土结构的重要性。随着混凝土空心高桥墩、过江电缆塔、高烟囱、冷却塔等混凝土结构的应用以及大跨度预应力混凝土箱形桥梁的发展，温度应力对这些结构的影响和危害，越来越引起工程界的重视和研究。60年代以来，国内外都发现由于温度应力而导致混凝土结构严重裂损的事故。例如，英国渡桥镇几座冷却塔的严重裂损；德国几座厚腹板箱形桥梁的损坏，其中两座桥梁几乎坍塌，德国的 Schmargendorf 桥的裂损修复耗资高达 12×10^5 马克。在对德国 Jagst 桥厚腹板箱梁的检查中发现，通车第五

年才发生严重裂缝，经估算温度拉应力高达 $26 \times 10^5 \text{Pa}$ ；美国对 Champigny 箱形桥梁的支座反力变化进行观测，一日内高达26%（相当于这一反力变化值的箱梁顶、底板表面的等效温差为 10°C ，仅由这一温差引起的最大下翼缘应力就可达到 $39.2 \times 10^5 \text{Pa}$ ）；新西兰一座新市场高架桥的预应力混凝土箱梁，因日照产生的大温差导致该桥发生严重裂损，不得不耗资 3×10^5 美元进行修复。国内，芜湖过江电缆塔、空心高桥墩、通惠河连续箱梁、九江长江大桥引桥40m 箱梁、漓江二桥箱梁等等也都发生了裂缝。这些裂缝的出现与设计中没有充分考虑温差应力有密切关系。

Fritz Leonhardt 在“混凝土桥梁的裂缝损害——原因与补救”一文中，曾提到在箱形桥梁和板梁桥的桥面板表面和下边缘之间，温差可达到 $27 \sim 33^\circ\text{C}$ 。如按此温差计算，连续箱形梁的支点反力变化则更为可观。因此，设计上应充分考虑由于温度变化引起的支座反力的再分配，在连续梁等体系中，由于端跨增加剪力，桥台有可能发生承压破坏。特别是箱梁会引起很大的横向应力。在施工阶段，这种温度引起的上拱度变化，将导致施工脚手架荷载的重分布，很有可能使一些脚手架的杆件超载。曾经有一座桥梁，在施工过程中由于这个原因造成脚手架坍塌。为此，Fritz Leonhardt 认为预应力混凝土箱形桥梁大都因温差应力而损害，这说明温差应力已成为危险因素。所以在没有考虑温差应力的设计中，如果轻信计算荷载下不发生拉应力，结构就不会出现拉应力是错误的。因为在所有混凝土结构中，还存在温差应力，这将引起混凝土结构的开裂损害。

长期以来，人们曾想通过限制荷载引起的混凝土拉应力，达到防止裂缝的目的。如上所述，通过这样的规定来防

止裂缝是达不到目的的。因为，预应力混凝土结构中的大部分裂缝，并非由荷载应力所引起，而是由温度等其它因素引起的局部应力和约束应力所致，且温度是一主要因素，而这种温差应力是不能避免的。

对此，如果在混凝土结构设计中，适当降低预应力度，增设普通钢筋，以控制这种裂缝，则将有利于混凝土结构的强度与安全。因此，研究分析混凝土结构的温度荷载与温差应力，对控制混凝土结构的裂缝是十分重要的，而温差应力检算则是混凝土结构设计中的一项重要内容，否则混凝土结构在运营刚度和使用条件等方面，不能满足设计要求。不仅如此，有的甚至连安全都得不到保证。

四、国内外概况

近三十年来，国内外对混凝土结构的温差应力做了许多研究工作，进行了一系列现场试验观测和理论研究。最初，曾以年温变化产生的均匀温度分布为依据，分析桥梁等结构的位移和拱桥约束应力。但因混凝土弹性模量的取值问题没有搞清楚，致使计算温差应力很大，而实际又非如此。因此长期以来，工程界对年温变化产生的温差应力表示怀疑，认为结构中的温差应力是虚的。后来因混凝土桥梁不断发生裂损，才开始考虑混凝土结构的温度梯度问题，即混凝土结构的不均匀温度分布。例如，美国的Zuk研究了由气象资料估计桥梁温度分布，指出气温、风、太阳辐射和材料种类都会影响桥梁的温度分布，并导出了结合梁顶、底面之间的最大温差的近似方程。继而在进行实桥观测的基础上，用线性温度分布，分析了结合梁的温度应力。Maker在对Madway等桥梁的实测基础上，假定箱形连续梁以线性分布的温度荷载

分析，并设箱形梁截面二边及底板的温度恒定。后期，随着试验研究工作的进展，开始认识到沿混凝土结构内部的温度分布是非线性的。因此，在工程计算中，英国的 D.A. Stephenson 以表面温度波幅为依据，用指数函数来分析混凝土结构沿壁板厚度方向的温度分布。新西兰的 M.J.N. Priestley 在对澳克兰新市场高架桥的模型试验研究中，也求得了非线性分布规律。德国的 Fritz Leonhardt 和 F. Kehlbeck 等学者在他们的论著中，也都确定了非线性的温度分布规律。后者还用矩阵方法计算了气象资料与结构温度分布的定量关系。

70年代初，德国的达姆斯塔特大学圬工结构研究所，对跨越美茵——万塞尔铁路的高架公路桥作了温度量测。M. Herzog 对杜廷根的 Aare 桥也进行了观测。此外，英国的 Emerson 曾用平均温度和最大温度的气象资料定出桥梁的温度范围和相应的位移，美国的 Hunt 和 Cooke、J.H. Emanuel 发表了组合梁中的温度分布。与此同时，英、美、日等国也对实桥进行了现场观测工作。

温度应力方面，首先是 Fritz Leonhardt 对德国几座预应力混凝土箱梁桥发生严重裂缝的情况进行了分析，提出了横向温度应力估计值，定量地讨论了厚壁箱梁的温度应力问题，认为温度应力是预应力箱梁发生裂缝的主要原因。稍后，F. Kehlbeck 在“太阳辐射对桥梁结构影响”的论著中，较系统地分析了各种气象因素对混凝土桥梁结构各部分表面温度的影响，求得了以矩阵形式表示的温度函数，并按一维不稳定导热理论解得了厚板的自约束应力和桥梁的体系约束应力。这个方法虽然考虑较多因素，但因计算方法复杂，在工程设计中不便于使用。新西兰的 M.J.N. Priestley

根据澳大利亚和新西兰地区因温度作用引起的桥梁损坏，分析了由垂直温度梯度引起的纵向温度应力，提出了可供电算编制程序的计算方法。英国的 D.A. Stephenson 分析了柔性柱体的温度应力问题，从而使温度应力研究有了明显的进展。

国内对混凝土结构温度分布与温度应力的试验研究（混凝土大坝结构除外），起步于50年代末，首先是铁道部大桥工程局对实体桥墩温度分布作了调查研究。铁道部第四勘测设计院对薄壁空心高桥墩的日照温度应力问题进行了初步研究。60年代中期，铁道部科学研究院西南研究所对预应力拼装式箱形桥墩进行了现场观测和模型试验，首次测定了混凝土结构的温度分布，证实了在空心桥墩中存在相当大的温差，在壁厚为0.25m的箱形薄壁空心桥墩中，当墩内外的气温差只有 $2\sim 3^{\circ}\text{C}$ 时，桥墩内外表面的温差可达到 15°C 以上。因而，空心混凝土结构的温差荷载问题，引起了工程界的广泛重视。此后，试验研究工作一度因故中断。直至70年代中期，铁道部第四勘察设计院与铁道部科学研究院西南研究所等对长沙水塔进行温度场和温度应力观测，取得了厚壁空心筒体结构的实测数据，当壁厚为0.5~0.7m时，内外表面温差可达到 20.6°C 。铁道部科学研究院西南研究所与上海铁道学院、铁道部第四勘测设计院等单位对壁板式柔性墩进行了温度应力模型试验研究。接着上海铁道学院与铁道部第四勘测设计院对壁板式柔性墩的温度场进行现场观测，取得了大量的壁板式柔性墩的温度分布资料。近年来，铁道部科学研究院西南研究所等对江油、重庆240m高烟囱的温度应力进行了现场观测。

在理论分析方面，70年代中期，铁道部第四勘测设计院

对钢筋混凝土圆形空心桥墩的日照温度应力进行了分析。沿墩壁厚度方向的温度分布，以表面温度波幅为依据，并用各点温度波幅的包络线作为沿壁厚方向的温度分布曲线。此后，铁道部科学研究院西南研究所、上海铁道学院等单位在壁板式柔性墩的模型与现场观测的基础上，分别提出了研究报告。铁道部第四勘测设计院在长沙水塔的现场观测基础上提出了圆形空心高墩的温度应力研究报告。致使混凝土桥墩方面的温度应力试验研究有了明显的进展。1978年南京桥梁会议之后，随着大跨度混凝土箱形桥梁的兴建，如红水河铁路斜拉桥、九江长江大桥引桥40m简支箱梁等，温度应力的试验研究工作由桥墩结构转向桥跨结构。于1978年起，铁道部科学研究院西南研究所建立了混凝土桥梁温度应力研究组，开始了系统的试验研究工作。首先结合红水河铁路斜拉桥进行预应力混凝土箱梁的温度分布与温差应力的现场观测与试验工作。试验研究对象有箱梁、塔柱、斜缆等结构部分。观测项目计有日辐射、风速、气温等气象资料，历时三年有余。为了对比，稍后，又在九江长江大桥引桥的40m预应力混凝土箱梁中进行了现场试验工作。两座大桥的现场观测工作历经五年时间，铁道部科学研究院西南研究所取得了大量的实测资料，同时在理论研究方面也取得了良好的进展，基本上解决了混凝土桥梁的温度荷载与温差应力的理论计算问题。建立了简明的工程设计实用计算方法。该计算方法已于1984年6月纳入1986年出版的《铁路桥涵设计规范》(JBJ2-85)；温度荷载和温度应力计算方法以及测试方法研究成果于1986年取得了铁道部科技进步二等奖，1987年列入国家科委重大科技成果。此后结合哈尔滨松花江大桥的温度场观测，进行寒冷地区混凝土桥梁结构的温度分布研究。

与此同时，交通部西安公路研究所对兰州黄河大桥预应力混凝土箱梁的温度分布进行实桥观测与分析，牙克石林业勘察设计院对模型箱梁的温度场进行室外观测和分析，哈尔滨建筑工程学院对黑龙江省的都德公路桥进行了温度分布观测，黑龙江省交通科学研究所对哈尔滨松花江大桥继续进行温度分布观测。为我国寒冷地区混凝土桥梁结构的温度分布取得了宝贵的实测资料。湖南省交通科学研究所对混凝土双曲拱桥的温度分布与温度应力作了分析研究。

上述国内几个单位的试验研究工作，促使混凝土结构温度应力的研究在国内深入开展，并取得了显著的成绩。

五、本书论述范围

迄今为止，除了混凝土大坝结构的温度荷载与温度应力已有专著之外，尚无一本专著论述各种混凝土结构的温度荷载与温差应力问题。本书结合国内有关规范，着重分析混凝土桥梁结构和圆形、箱形筒体结构等混凝土结构的温度荷载与温差应力问题，并结合工程实例进行具体的分析计算。

从内容方面讲，本书论述日照与骤然降温和水化热等短时温度变化的温度荷载与温差应力。对工程界已熟悉的结构均匀温度变化所产生的年温变化温度荷载，在此不加赘述。

论述方式，本书以理论分析与试验研究为依据，应用工程技术界所熟悉的工程力学方法分析。讲清概念，偏重实用，避免繁琐的一般理论分析，着重工程实用计算方法阐述，并详述导出过程，配以适当算例，以方便读者理解和运用。

§ 1-2 混凝土结构的温差应力特点

混凝土结构的温差应力，实际上是一种约束应力。当结

构物由于温度变化产生的变形受到约束时所产生的应力，即称为温差应力。反之，如果结构物因温度变化而产生的变形，能自由地伸缩时，则不会发生这种温差应力。本书所指的约束应力包括内约束应力和外约束应力，内约束应力是由于结构物内部某一构件单元中，因纤维间的温度不同，所产生的应变差受到约束而引起的应力；外约束应力则是结构或体系内部各构件，因温度不同所产生的不同变形受到约束所产生的应力。

特点之一，它与一般荷载应力不同。基本上应力和应变不再符合简单的虎克定律关系；出现应变小而应力大，应变大而应力小的情况。与普通荷载应力符合应力与应变成正比规律的情况不同，但是伯努里的平面变形规律仍然适用。温差应力则与平面变形后所保留的温度应变和温度自由应变差成正比。

特点之二，由于混凝土结构的温度荷载沿壁板厚度方向的非线性分布，故截面上温度应力分布具有明显的非线性特征。

特点之三，因混凝土结构的温度分布是瞬时变化的，所以在结构中的温度应力也是瞬时变化的，具有明显的时间性。

上述三个特点，在分析确定混凝土结构的温度荷载与温度应力时，要充分考虑到。这一点对大部分习惯于荷载应力分析的工程技术人员来说，分析混凝土结构的温差应力则要复杂一些。但目前对温差应力的分析，也有了比较简明的计算方法。

第二章 温度分布与温度荷载

§ 2-1 概 述

混凝土工程结构设计中，考虑温度变化的影响，在桥梁结构物、圆形贮料筒仓、冷却塔、烟囱等高耸塔桅结构的设计规范中，早有规定，但以往只考虑变化缓慢的年气温变化荷载以及定值的工作温度荷载。近二十年来，国内外混凝土工程结构的实践证明，仅仅考虑年气温变化荷载是远远不够的，因为对许多工程结构来说，这种温度荷载，只产生结构（静定）的温度位移，不会发生温差应力。许多工程结构物在施工与运营中发生严重的裂损现象表明，还存在引起结构物裂损的温差荷载。通过大量试验研究证明，短时的变化急剧的太阳辐射引起的结构温度变化和骤然降温（包括日落降温、寒流等）引起的结构温度变化，对混凝土结构的影响比长期缓慢的年气温荷载影响更大。太阳辐射等引起的温度变化荷载将产生相当大的温差应力，致使混凝土工程结构发生严重裂损。为此，本章将详细论述这种短时变化的温度荷载，介绍有关试验研究资料，提出工程实用的计算方法。并介绍国内外有关温度荷载的设计规范条文与说明。

§ 2-2 温度荷载的分类、形成与特点

置于自然环境中的混凝土工程结构，经受各种自然环境条件变化的影响。显然混凝土工程结构的表面与内部各点温

度随时都在发生变化。它与所处的地理位置、地形地貌条件、结构物的方位、朝向以及所处季节、太阳辐射强度、气温变化、云、雾、雨、雪等等有关。在工程结构物的内外表面处，还不断地以辐射、对流和传导等方式与周围空气介质进行热交换。因此结构物处于十分复杂的换热过程中，由此形成的工程结构物的温度分布也是很复杂的。但就混凝土工程结构来讲，由于自然环境条件变化所产生的温度荷载，一般可分为以下三种类型：一、日照温度荷载；二、骤然降温温度荷载；三、年温温度荷载。日照温度变化主要是太阳辐射作用所致，其次是气温变化影响，后者相对于前者来说要小得多，再次之是风速影响。降温温度变化主要是强冷空气的侵袭作用和日落后在夜间形成的内高外低的温度分布。年温变化则是极缓慢的气温变化所致。上述几种温度荷载，都是自然环境条件变化所造成的，人们难以消除它。除上述几种荷载外，还有人为造成的温度荷载，如施工灌注阶段由于混凝土水化热引起的温度荷载；工程结构在运营阶段因使用目的造成的温度荷载，如高烟囱中的高温烟气形成的温度荷载，贮料筒结构中因物料温度形成的温度荷载（如水泥库、冷库等）以及核反应堆混凝土防护壳体由于核反应产生的高温温度荷载等等。这种人为因素造成的温度荷载，一是可以控制；二是比较稳定，往往可通过工艺措施予以控制，使其降低，然后再以稳定温差分析其对结构物的影响。关于这方面问题将在以后章节中予以介绍，本章论述因自然环境条件变化所造成的温度荷载。

工程结构物由于日照、骤然降温、年温变化等产生的温度荷载，其不同特点，见表2-1。

各种温度变化表

表2-1

	主要影响因素	时间性	作用范围	分布状态	对结构影响	复杂性
日照温度变化	太阳辐射	短时急变	局部性	不均匀	局部应力大	最复杂
骤然降温变化	强冷空气	短时变化	整体	较均匀	应力较大	较复杂
年气温变化	缓慢气温变化	长期缓慢	整体	均匀	整体位移大	简单

一、日照温度变化

工程结构物的日照温度变化很复杂，影响因素众多，主要有以下几个方面：太阳的直接辐射、天空辐射、地面反射、气温变化、风速以及地理纬度、结构物的方位和壁板的朝向、附近的地形地貌条件等等。因此，工程结构物由于日照温度变化引起的表面和内部温度变化，是一个随机变化的复杂函数。表面温度变化具有明显的谐波曲线特性，但又随壁板朝向不同而有明显的差别。其中既有太阳辐射引起的明显的局部性，又有混凝土的热传导特性带来的不均匀性，难以直接求得函数解，只能进行近似的数值解。但从工程应用角度考虑，可以从大量的实测资料分析中，得出以下结论：在结构物所在地的地理纬度、方位角、时间及地形条件确定的情况下，影响结构日照温度变化的主要因素是太阳辐射强度、气温变化和风速。如从应用角度考虑，为了求得日最大表面温度，风速这个因素也可忽略，因为当工程结构表面温度达到最大时，风速几乎接近于零。这样我们从设计控制温度荷载考虑，影响工程结构表面温度的因素，实际上可简化为只有太阳辐射与气温变化这两个因素。这两个因素各气象

台、站均有观测资料可查。由此，我们通过大量的现场观测资料的统计分析，可求得简明的工程结构表面温度的半经验半理论公式，并能求得沿壁板厚度方向的温度分布曲线。

二、骤然降温温度变化

一是工程结构物在冷空气侵袭作用下，使结构外表面迅速降温，结构物中形成内高外低的温度分布状态，二是日照降温，由于日落等因素致使结构外表面温度迅速下降，此时结构物内表面温度几乎没有什么变化，形成较大的内高外低的温差状态。这两种降温温度变化，一般只要考虑气温变化和风速这两个因素，可以忽略日辐射影响。这种降温温度荷载其变化较日照温度荷载要缓慢一些。变化过程约为20h左右，比日照温度变化作用时间长些。在这两种降温温度荷载中，冷空气侵袭作用引起的结构物降温速度，南方地区平均降温速度为 $1^{\circ}\text{C}/\text{h}$ ，最大降温速度为 $4.0^{\circ}\text{C}/\text{h}$ ，比日照升温速度 $10^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 要小得多。

三、年温温度变化

混凝土结构物，由于年温变化所引起的结构物温度变化，因其是长期的缓慢作用，使得结构物整体发生均匀的温度变化。所以，在考虑年温对结构物的影响时，均以结构物的平均温度为依据。一般规定以最高与最低月平均温度的变化值作为年温变化幅度。因年温变化比较简单，且这个因素在工程结构设计中早已被考虑，所以在此不加赘述。

§ 2-3 混凝土的热物理特性

混凝土结构内部，其结构是由水泥浆和骨料等组成的，