

钢筋混凝土箱梁日照温度效应研究

GANGJIN HUNNINGTU
XIANGLIANG RIZHAO WENDU
XIAOYING YANJIU

康为江 著

湖南大学出版社
HUNAN UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

本书通过试验测试两跨连续钢筋混凝土箱梁和钢筋混凝土简支箱梁的有关温度效应，对钢筋混凝土箱梁桥温度场及温度应力进行理论分析，编制有限元程序求解钢筋砼箱梁桥二维不稳定温度场，计算最不利温差分布的温度应力。通过将实测值与程序计算值进行比较分析，验证程序的正确性，分析各物理参数及几何参数对温度场及温度应力的影响，从而对钢筋砼箱梁桥的温度裂缝的控制提出一些参考性意见。

图书在版编目（CIP）数据

钢筋混凝土箱梁日照温度效应研究/康为江编著. —长沙：湖南大学出版社，2020.12

ISBN 978-7-5667-2059-7

Ⅰ.①钢… Ⅱ.①康… Ⅲ.①钢筋混凝土桥—箱梁桥—研究 Ⅳ.①U448.34

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2020）第 221961 号

钢筋混凝土箱梁日照温度效应研究

GANGJIN HUNNINGTU XIANGLIANG RIZHAO WENDU XIAOYING YANJIU

编　　著：康为江
策划编辑：卢　宇
责任编辑：黄　旺　**责任校对**：罗素蓉
印　　装：广东虎彩云印刷有限公司
开　　本：787 mm×1092 mm　1/16　**印张**：5.5　**字数**：152 千
版　　次：2020 年 12 月第 1 版　**印次**：2020 年 12 月第 1 次印刷
书　　号：ISBN 978-7-5667-2059-7
定　　价：22.00 元

出 版 人：李文邦
出版发行：湖南大学出版社
社　　址：湖南·长沙·岳麓山　　**邮　　编**：410082
电　　话：0731-88822559(营销部)，88821315(编辑室)，88821006(出版部)
传　　真：0731-88822264(总编室)
网　　址：http://www.hnupress.com
电子邮箱：274398748@qq.com

版权所有，盗版必究
图书凡有印装差错，请与营销部联系

前　言

众多研究表明，由于混凝土的导热性差，在周围环境迅速升温的状况下，温度无法传导到混凝土内部，使得混凝土内外表面温差较大，产生了较大的温度应力。温度应力是混凝土桥梁遭到破坏的主要原因。

截至今日，众多国内外研究学者在砼结构的温度应力方面做了许多研究探讨工作，进行了一系列的现场试验观测和理论研究，取得了相当好的成果，完善了理论研究基础并且积累了宝贵经验，为后人的深入研究铺平了道路。

本书结合国家自然科学基金课题——砼薄壁箱形构件的受力性能及设计方法研究(批准号 59808005)，参考前人的实验结果和论文文献，通过实验及计算机模拟来探讨公路箱梁桥的温度场及温度应力，编制求解砼箱梁桥二维不稳定温度场的有限元程序，并通过试验来检验程序的正确性；通过计算机模拟分析来确定有关砼箱梁温度应力计算参数的合理取值以及寻求实验中某些无法模拟的外界因素(如风速、太阳辐射条件等)对温度场及温度应力的影响，并分析普通矩形箱梁与斜腹板箱梁的温度梯度模式是否存在差别。同时，通过计算分析，对钢筋混凝土箱梁温度裂缝的控制提出一些参考性意见。

本书的出版，要特别感谢湖南大学设计研究院有限公司的大力支持。

由于作者水平有限，书中难免存在错误和不妥之处，恳请读者批评指正。

作　者

2019 年 5 月

目　次

第 1 章　绪论 …… 1

1.1　概述 …… 1

1.2　国内外研究概况 …… 1

1.3　混凝土结构的日照温度效应 …… 3

1.4　本书研究的主要内容 …… 9

第 2 章　钢筋砼箱梁日照温度效应试验研究 …… 10

2.1　试验模型的设计 …… 10

2.2　测试仪器及测点布置 …… 10

2.3　试验的基本情况 …… 12

2.4　试验结果整理 …… 13

第 3 章　用有限单元法求解钢筋砼箱梁日照温度场 …… 28

3.1　引言 …… 28

3.2　太阳辐射及大气温度日过程 …… 29

3.3　计算参数的确定 …… 31

3.4　温度场的有限元分析 …… 35

3.5　试验模型的温度场计算 …… 48

第 4 章　钢筋砼箱梁日照温度应力分析与计算 …… 53

4.1　引言 …… 53

4.2　钢筋混凝土箱梁在日照作用下的自约应力计算 …… 53

4.3　钢筋混凝土箱梁在日照作用下的外约应力计算 …… 55

4.4　钢筋混凝土箱梁在日照温度荷载作用下温度应力的精确计算 …… 57

4.5　对钢筋混凝土箱梁日照温度应力计算中几个问题的探讨 …… 59

4.6　两跨连续箱梁试验模型温度应力的计算与分析 …… 61

第 5 章　钢筋砼箱梁日照温度应力计算中各参数的影响 …… 66

5.1　温度梯度参数 T_0 及 a 对温度应力计算值的影响 …… 66

5.2　各几何尺寸及物理参数对温度梯度参数 T_0 及 a 的影响 …… 70

第 6 章　钢筋砼箱梁温度裂缝的特点及控制 …… 76

6.1　温度裂缝的特点 …… 76

6.2　钢筋混凝土箱梁温度裂缝控制 …… 77

第7章　结论 …… 79
7.1　成果 …… 79
7.2　尚存在的问题 …… 79
参考文献 …… 80

第1章　绪论

1.1　概述

统计表明，近20年来，国内外修建的桥梁结构中，箱形梁占了绝对的多数[1]。由于砼结构的热传导性能差，周围环境气温以及太阳辐射等作用，其表面温度迅速变化，而内部温度仍处于原来状态，由此产生的温度变形被结构的内、外约束阻碍时，会产生相当大的内约温度应力和外约温度应力。箱梁的温度荷载（现称温度作用，本书援引惯用名称“温度荷载”）就是因外界自然条件变化引起的结构内部和表面的温度变化[2]。刘兴法在文献[3]中阐述了这种温度应力的特点：一是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胡克定律关系，而是出现小应变大应力和大应变小应力的情况，但是伯努利的平面变形规律仍然适用，温度应力则与平面变形后保留的应变和温度自由应变之差成正比；二是由于温度荷载沿壁板厚度方向的非线性分布，导致截面上温度应力的分布具有明显的非线性；三是由于这种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。国内外学者在研究了众多桥梁破坏事故以后一致认为，桥梁破坏的主要原因是太阳辐射、大气温度及其他某些外界因素的日过程在桥梁结构内产生的非线性温差引起的温度应力[4][5][6]。例如，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，经估算温度应力高达26×10^5 Pa；美国对Clcampiny箱形桥梁的支座反力变化进行观测，发现其变化量一日内高达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 ℃，仅由这一温差引起的最大下翼缘应力就可达到39.2×10^5 Pa）；新西兰一座预应力砼箱梁的高架桥，因日照产生的大温差而发生严重裂损，不得不耗资30万美元进行修复。而我国的通惠河连续箱梁、九江长江大桥引桥40 m箱梁、漓江二桥箱梁等也都发生了裂缝[3]。试验研究表明，箱梁某些部位的温度应力比荷载应力还大，这成为预应力砼箱梁发生裂缝的主要原因[2]。因此，弄清预应力砼箱梁桥的温度场及温度应力分布，对于完善箱梁设计理论，保证箱梁结构的经济适用、安全具有重大的实用价值和理论意义。

1.2　国内外研究概况

二十世纪六十年代初以来，国内外许多学者对砼结构的温度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。例如，美国的ZUK研究了由气象资料估计桥梁的温度分布，并导出了结合梁的顶底面之间的最大温差近似方程，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在实测基础上对Madway等桥梁进行分析时也是假定箱形连续梁的温度荷载为线性分布，并假设箱形梁截面二边及底板的温度恒定。随着试验研究工作的进展，研究人员开始认识到砼结构内部的温度分布是非线性的。在工程计算中，英国的D. A. Stephenson以表面温度波幅为依据，用指数函数来分析砼结构沿壁板厚

度方向的温度分布。美国的 M. J. N. Priestley 在对澳克兰市场高架桥的模型试验中，也求得了温度非线性分布规律。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。经过理论研究、模型试验以及现场测试而提出的用一维导热方程按第三类边界条件以确定砼公路梁跨结构内部的温度分布计算方法至今在欧美普遍应用。二十世纪七十年代初，德国的 F. Kehlbeck 在他的博士论文中指出：如果结构构件内一维不稳定温度分布可以用数学方式来描述，则不稳定温度分布产生的应力就可以用弹性薄板理论来进行计算。他在论文中详细论述了太阳辐射、大气逆辐射等因素对于桥梁结构的影响，分析了辐射气温、外界气温、结构表面温度的影响和各种计算常数的确定，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应力和桥梁的体系约束应力。这个方法虽考虑因素较多，但其计算较为复杂，在工程设计中不便于使用。Fritz Leonhardt 对德国几座预应力砼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。美国的 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。二十世纪八十年代初，加拿大 Calgary 大学的 Amin Ghali，Walter H. Dilger 及 Mamdouth M. Elbadry 等学者对砼桥梁及钢-砼组合箱梁的温度应力做了一系列的研究[7][8][9][10][11][12][13][14]。Mamdouth M. Elbadry 和 Amin Ghali 在文献[8]中，研究了简支梁和连续梁中由于温度非线性变化引起的纵向自约应力和外约应力，通过比较不同的截面形状、截面高度、地理位置、材料特性及覆盖物等对结构纵向自约应力和温度弯矩及外约应力的影响，定性地提出了最不利温度荷载状态，并编制了有限元计算机分析程序 FETAB 来预测温度场的分布及相应的纵向应力。这些工作为有关规范的制定提供了一系列参考数据。

在国内，孔详谦、沈肇基、王传薄等学者对不稳定温度场的数值解法进行了深入研究[15][16]，为砼工程结构温度场与温度应力的研究奠定了基础。二十世纪五十年代末，铁道部大桥工程局就对实体墩的温度分布做了调查研究，铁道部科学研究院西南所对预应力拼装式箱形桥墩进行了现场观测和模型试验，首次测定了砼结构的温度分布。1978 年南京桥梁会议之后，随着大跨度砼箱形桥梁的兴建，如红水河铁路斜拉桥、九江长江大桥引桥 40 m 简支箱梁等，国内开始了砼箱梁桥的温度应力研究工作。1978 年铁道部科学研究院西南所建立了砼桥梁温度应力研究组，开始了系统的实验研究工作。首先结合红水河铁路斜拉桥进行预应力砼箱梁的温度分布与温度应力的现场观测与试验工作。为了对比，后又在九江长江大桥引桥 40 m 预应力砼箱梁中进行了现场试验工作。此后结合哈尔滨松花江大桥的温度场观测，进行了寒冷地区砼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砼箱梁的温度分布进行了实桥观测与分析，牙克石林业勘察设计院对模型箱梁的温度场进行了室外观测和分析。这些工作为我国寒冷地区砼箱梁桥的温度分布研究取得了宝贵的实测资料[3]。在众多学者的努力下，砼箱梁桥的温度应力计算理论也取得了良好的进展，基本上解决了砼箱梁桥的温度荷载与温度应力的理论计算问题。以铁道部科学研究院西南所的刘兴法为代表的一大批学者对预应力砼箱梁桥的温度应力进行了深入研究，并取得了一系列重要成果，使箱梁温度应力计算理论逐渐完善起来。刘兴法在文献[2]中，系统论述了预应力砼箱梁桥的温度分布与温度应力问题，通过对红水河铁路斜拉桥和九江长江大桥的大量现场试验与观测资料的分析和研究，建立了预应力砼箱梁的控制温度荷载及相应的温度应力计算方法，并将箱梁的温度场简化为二维温度场，按竖向和横向的一维温度场计算再进行简单的迭加

来计算温度应力，同时考虑了横向温度荷载。该计算方法被铁道部终审通过，并于1984年6月被纳入“铁路桥涵设计规范”。刘兴法在文献[3]中系统地论述了砼工程结构在自然环境中温度变化作用下的计算理论与方法，对砼结构日照温度荷载、骤然降温荷载及相应的温度应力均进行了分析，并论述了与砼结构温度应力有关的几个主要问题且进行了横向应力简化计算与精确计算的比较。刘兴法在文献[17]中指出，箱形桥墩(梁)沿截面的日照温度分布，略去两侧壁板内外表面很小的温度差别，以向阳面为基线，按指数函数规律递减。刘兴法根据箱形桥墩(梁)的已知温度分布条件与静力学的基本假定(即截面的平面变形、应力应变的线性关系)以及基本平衡方程来求解箱形桥墩(梁)的日照温度应力及位移，认为无碴无枕箱梁迎桥面正晒是控制情况，而当采用道碴桥面时，侧晒应是控制情况。重庆建筑工程学院的魏光坪用伽辽金加权余量法导出了在日照或大气温度或两者共同作用下箱梁温度场及简支箱梁温度应力的计算模型，并编制出能在计算机上实现的通用程序。文献[18]提出了确定砼桥梁温度设计值的近似方法，在数值法的基础上得出了关于估算温度设计值参数的研究结果。王效通从箱梁内壁表面之间有辐射换热，而视箱内空气为完全透射的假定出发，导出内边界条件，给出计算太阳辐射的一系列公式和用矩形单元有限元法计算箱梁温度场的计算模型，并编制了相应的电算程序[19]。胡匡璋等在文献[20]中，推导了用矩形单元有限元法计算第一类、第三类边界条件不稳定温度场及温度应力的计算模型，根据该计算模型编制了电算程序，并对计算结果与实测数据进行了分析与比较，两者吻合较好；特别是对柔性墩的温度场与温度应力进行分析计算，得出了若干规律性意见，并提出了柔性墩温度场与温度应力计算的简明表达式。房国安、多玉阁[5]应用一维导热方程按第三类边界条件以确定混凝土公路梁跨结构内部温度分布的解析法和天津市1977年有关气象资料分析了三跨连续梁的竖向温度分布和相应于最大温差分布的纵向温度应力，并探讨了不同计算参数对温度应力的影响。

总之，国内外学者在钢筋砼箱梁桥的温度场与温度应力方面做了不少有益的研究与探讨，并取得了相当显著的成果，积累了许多宝贵的经验，使得其计算理论能逐步得以完善，为后人的进一步深入研究铺平了道路。但是，在温度场模式的选取方面，各国规范的规定有所不同，以致在同等条件下按不同规范规定的温度场所得到的计算结果会在某些控制截面上出现温度应力反号的情况[21]。这就使得在工程设计时出现了这样一个问题：到底哪种温度场才是合理的温度场？本书结合国家自然科学基金课题——砼薄壁箱形构件的受力性能及设计方法研究(批准号59808005)，通过实验及计算机模拟来探讨公路箱梁桥的温度场及温度应力，编制求解砼箱梁桥二维不稳定温度场的有限元程序，并通过试验来检验程序的正确性。另外，通过计算机模拟分析来确定有关砼箱梁温度应力计算参数的合理取值以及探讨某些在实验中无法模拟的外界因素(如风速、太阳辐射条件等)对温度场及温度应力的影响，并分析普通矩形箱梁与斜腹板箱梁的温度场模式是否存在差别。同时，通过计算分析，对钢筋混凝土箱梁温度裂缝的控制提出一些参考性意见。

1.3 混凝土结构的日照温度效应

1.3.1 温度荷载的分类、形成及特点

置于自然环境中的混凝土结构，经受各种自然环境条件变化的影响，其表面与内部各点温度随时都在发生变化，这些温度变化与结构物方位、朝向、所处地理位置以及太阳辐射强度、季节、天气变化等有关。在工程结构物的内外表面上，混凝土结构还不断以辐射、对流和传导等

方式与周围空气介质发生热交换。因此，结构物处于十分复杂的热交换过程中，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，一般可分为三种类型：日照温度荷载、骤然降温温度荷载、年温温度荷载。日照温度变化主要是受太阳辐射作用影响，其次是受气温变化影响，后者相对于前者来说影响力要小得多。再次是受风速的影响。骤然降温温度变化主要是受强冷空气的侵袭影响。其次是受日落后在夜间形成的内高外低的温度变化影响。年温温度变化则是受极缓慢的气温变化影响。上述几种温度荷载，都是自然环境条件发生变化所造成的，人们难以消除它。除上述几种温度荷载外，还有人为因素造成的温度荷载，如施工浇筑阶段由于混凝土水化热引起的温度荷载，高烟囱中的高温烟气形成的温度荷载，贮料筒结构（如水泥库、冷库等）中因物料温度形成的温度荷载，核反应堆混凝土防护壳体中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，往往可以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。本书主要讨论日照温度荷载。

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的不同特点见表 1-1[3]。

表 1-1　各种温度变化表

温度变化	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
骤然降温温度变化	强冷空气	短时变化	整体	较均匀	应力较大	较复杂
年温温度变化	缓慢气温变化	长期缓慢	整体	均匀	整体位移大	简单

1.3.1.1　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。因此，由于日照温度变化引起的工程结构物表面和内部温度变化，是一个随机变化的复杂过程。工程结构物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局部性，又有混凝土的热传导带来的不均匀性。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，影响结构物日照温度变化的主要因素是太阳辐射、气温变化和风速。如从应用角度考虑，为求得日最大表面温度，风速这个因素也可以忽略，因为当工程结构物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，影响工程结构物表面温度的因素实际上可简化为只有太阳辐射和气温变化两个因素，而这两个因素在各气象台、气象站均有观测资料可查。

1.3.1.2　骤然降温温度变化

骤然降温温度变化分为两种情况：一是工程结构物在冷空气侵袭作用下，使结构物外表面迅速降温，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物外表面温度迅速下降，此时结构物内温度几乎没有变化，形成较大的内高外低的温差状态。这两种降温温度变化，一般只需考虑气温变化和风速这两个因素，可以忽略太阳辐射影响。这两种降温温度荷载变化较日照温度荷载变化要缓慢一些，变化过程约为 20 小时左右，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 ℃/h，最大降温速度为 4 ℃/h，比日照升温速度 10 ℃/h 要慢得多。

1.3.1.3 年温温度变化

混凝土结构物，由于受年温变化而发生温度变化，这种温度变化对结构物的影响是长期而缓慢的，这使得结构物整体的温度变化是均匀的。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。一般以最高月平均温度与最低月平均温度之间的变化值作为年温变化幅度。因年温变化比较简单，且在诸多文献中早有论述，在相关规范中也早有规定，而骤然降温温度变化与日照温度变化作用机理相同且相对较为简单，因此，本书对年温温度变化和骤然降温温度变化作用均不再赘述，而只考虑日照温度变化对钢筋混凝土箱梁的影响。

1.3.2 混凝土结构的温度场与温度应力

混凝土构件中的温度场，按其时间响应的性质可以分为稳态的和瞬态的，按混凝土构件的材料参数对于温度的依赖性可分为线性的和非线性的。

稳态温度场与时间无关，瞬态温度场则是时间的函数。线性问题的控制方程及边界条件中的热学参数均与温度无关，而在非线性问题中，它们为温度的函数。

混凝土中的温度变化取决于混凝土本身的热性能（包括混凝土的水化热、比热、导温系数、热传导率等）和外界介质的温度状况。在关于混凝土构件温度场的计算中，一般计算两类温度场：一类是混凝土硬化期间，由于混凝土中的水化热而产生的温度场；另一类是已经充分硬化并投入使用的混凝土受到外部介质的影响而产生的温度场。本书讨论的钢筋混凝土箱梁日照温度场问题属于后者。

温度场的分析在数学上归结为在给定的边界条件和初始条件下求解一个导热方程。稳态温度场属于边值问题，瞬态温度场则属于初值问题。

由于温度的变化而产生的应力称为温度应力。根据引起应力的原因，温度应力可以分为自约应力和外约应力。对于一个在边界上没有受到任何约束的静定结构，当内部的温度为均匀分布或呈线性分布时，结构内将不产生温度应力[22]。但是，当内部温度为非线性分布时，由于构件内各纤维间的温度不同，所产生的应变差受到相互之间的约束而产生温度应力，这种温度应力称为自约应力。如果结构的全部或部分边界受到约束，温度变化时结构不能自由变形，那么不论内部温度如何分布，都将会有温度应力产生，这种温度应力称为外约应力。在静定结构内只会出现自约应力，而在超静定结构中则可能同时出现自约应力和外约应力[23]。

1.3.3 国内外设计规范及相关标准中有关温度荷载的规定[3]

(1)英国桥梁规范 BS—5400

英国桥梁规范 BS—5400 中关于温度荷载的规定，是关于桥梁结构的温度荷载规定中较为详细的一个，在总则中考虑了气温、太阳辐射、逆辐射等的每日和季节变化因素，其相关内容摘录如下。

①荷载与荷载效应。

桥梁的整体温度变化称为有效桥梁温度，并且在规定的时期内，将会有最小值和最大值以及与之联系的有效桥梁温度的变化幅度。

由于下述因素，在桥梁内部产生荷载与荷载效应。

a.构造形式（如框架、拱、柔性墩、橡胶支座等）对伸缩的约束，称为“温度约束”。

b.滚动支座或滑动支座的摩阻，称为“摩阻支座约束”，在这些支座处允许结构伸缩。

c.桥梁上部结构的顶面与沿高度方向的某一水平面间的温度差异，称为“温差”。

有效桥梁温度可由气温等温线求得，该气温相当于开阔地区的平均值。

②最高和最低气温。

桥址处的最不利气温可根据桥梁所处的地理位置，查该处的等温线图求得。对于高于海平面的地区的气温调整，应按每增加 100 m，将最低气温降低 0.5 ℃和最高气温降低 1 ℃予以调整。此外，考虑最低气温的偏差调整。

③最高和最低的有效桥梁温度。

对不同构造类型的桥梁结构，最高和最低的有效桥梁温度，可分别根据最高和最低气温由表查得，并考虑铺装面层厚度予以调整。当结构被约束时，为确定由于温度约束而引起的荷载效应，分别以最高、最低有效桥梁温度作为计算伸胀、收缩的依据。

④温差。

桥梁内部的温差效应可由下述温差推求：由于太阳辐射和其他效应引起的结构顶面受热时的正温差；由于逆辐射和其他效应引起的结构顶面散热时的负温差。除了上述温差，另外需要考虑铺装面层厚度对温差的影响。

定义结构类型：1 类为钢桥面板的钢箱梁，设有 40 mm 厚的铺装面层；2 类为钢桥面板的钢板梁或钢料架；3 类为混凝土桥面板的钢箱梁、板梁、桁梁；4 类为有混凝土桥面板的混凝土梁或混凝土箱梁。

当 1、2 类桥梁结构的有效桥梁温度高于 25 ℃以及 3、4 类桥梁结构的有效桥梁温度高于 15 ℃时，应考虑最大温差与有效桥梁温度同时存在的情况；当 1、2 类桥梁结构的有效桥梁温度低于 8 ℃，3 类桥梁结构的有效桥梁温度低至 4 ℃以及 4 类桥梁结构的有效桥梁温度低至 2 ℃时，应考虑最大负温差与有效桥梁温度同时存在的情况。

计算温度效应时，结构钢材和混凝土的热膨胀系数可取用 $12\times10^{-6}℃^{-1}$，但混凝土采用石灰岩集料时，可取用 $7\times10^{-6}℃^{-1}$。

有混凝土桥面板的混凝土桥梁的温差值，按照图 1-1、图 1-2 及其相应的表 1-2、表 1-3 选取。

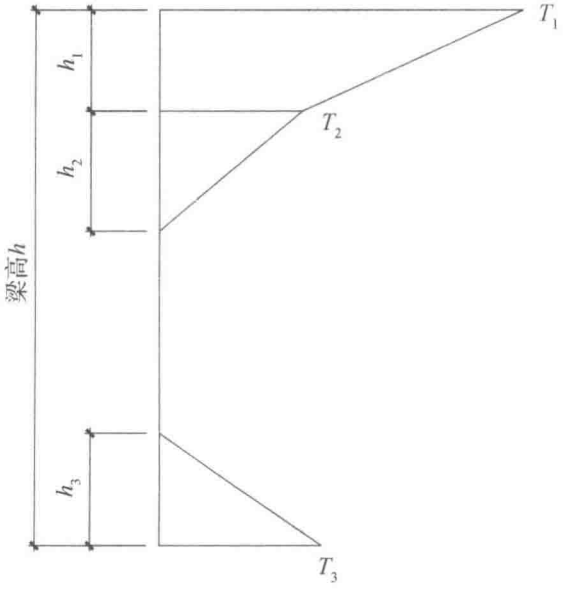


图 1-1　英国桥梁规范 BS—5400 规定的升温曲线

图 1-1 中，$h_1=0.3h\leqslant 0.15$ m；$h_2=0.3h\geqslant 0.1$ m 且$\leqslant 0.25$ m；$h_3=0.3h\leqslant$[0.1 m＋面层厚度]。

表 1-2　英国桥梁规范 BS—5400 规定的升温曲线表

h/m	T_1/℃	T_2/℃	T_3/℃
≤0.2	8.5	3.5	0.5
0.4	12.0	3.0	1.5
0.6	13.0	3.0	2.0
≥0.8	13.5	3.0	2.5

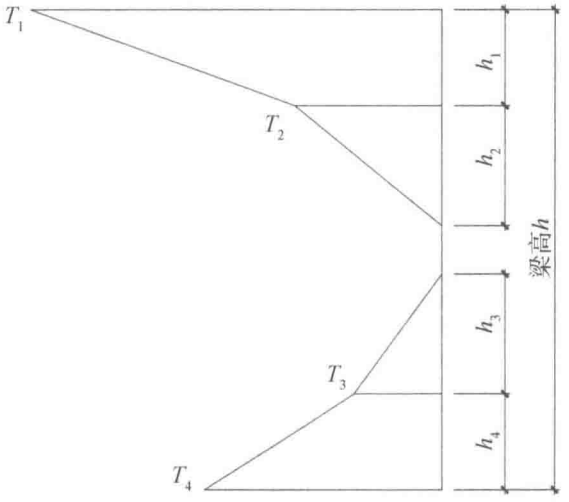


图 1-2　英国桥梁规范 BS—5400 规定的降温曲线

图 1-2 中，$h_1=h_4=0.2h\leqslant 0.25$ m；$h_2=h_3=0.25h\geqslant 0.2$ m。

表 1-3　英国桥梁规范 BS—5400 规定的降温曲线表

h/m	T_1/℃	T_2/℃	T_3/℃	T_4/℃
≤0.2	2.0	0.5	0.5	1.5
0.4	4.5	1.4	1.0	3.5
0.6	6.5	1.8	1.5	5.0
0.8	7.6	1.7	1.5	6.0
1.0	8.0	1.5	1.5	6.3
≥1.5	8.4	0.5	1.0	6.5

(2)日本道路桥梁设计标准

日本道路桥梁设计标准中，混凝土结构中的温度变化的范围是根据不同地区的平均气温确定的。一般情况下，温度升降值可分别采用 15 ℃。

根据桥面板和其他部分的温度差计算断面内的应力时，温差以 5 ℃为标准；温度分布在桥面和其他部分内分别被认为是均匀的。

对于混凝土桥梁，规范中规定顶底面的温差为 5 ℃到 15 ℃。

(3)美国桥梁规范 AASHTO

美国桥梁规范 AASHTO 规定的温差曲线如图 1-3 所示。

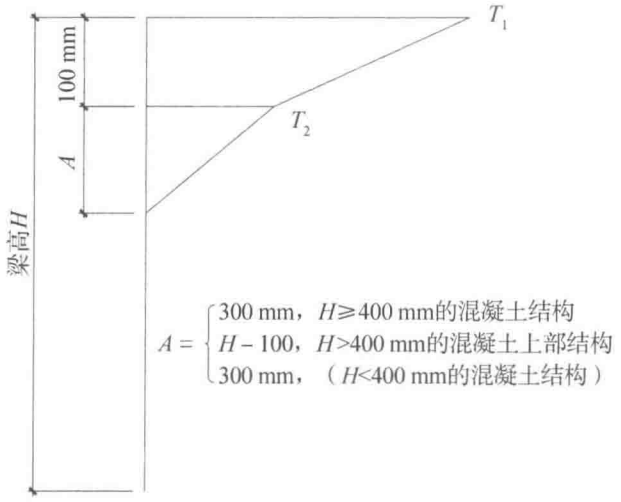


图 1-3　美国桥梁规范 AASHTO 规定的温差曲线

图中 T_1，T_2按表 1-4 取值。

表 1-4　美国桥梁规范 AASHTO 中温差曲线的 T_1，T_2 取值

气候区号	砼路面		50 mm 沥青路面		100 mm 沥青路面	
	T_1/℃	T_2/℃	T_1/℃	T_2/℃	T_1/℃	T_2/℃
1	30	7.8	24	7.8	17	5
2	25	6.7	20	6.7	14	5.5
3	23	6	18	6	13	6
4	21	5	16	5	12	6

(4)瑞士桥梁规范 SIA—162

瑞士桥梁规范 SIA—162 分别考虑了季温度变化和日温度变化对结构物的影响，并强调指出，为了防止意外的裂缝，除了按规定选择荷载验算外，还要根据规定计算横断面温度梯度的不同分布作用，并配置必要的钢筋。

(5)中国桥梁规范

①《公路钢筋及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTJ023—85)[24](以下简称《公路桥规》)规定在缺乏实测资料时，假定混凝土连续梁由于日照引起桥面与其他部分的温差为＋5 ℃(桥面板温度上升 5 ℃)，并在桥面板内均匀分布。

②《铁路桥涵设计规范》(TBJ2—85)[25](以下简称《铁规》)中对温度荷载的规定简述如下。

a.日照温度荷载。

箱梁沿梁高、梁宽方向的温差分布曲线，可按下式计算：

$$T_y=T_0\mathrm{e}^{-ay}$$

式中，T_y为计算点处的温差(℃)；T_0为箱梁沿梁高方向或梁宽方向的温差(℃)，对于标准设计按表 1-5 取用，对于特殊设计可按《铁规》附录十六计算；y 为计算点至箱梁外表面的距离

(m)；a 按表 1-5 取值。

表 1-5　系数 α 的取值表

梁别 / 方向	无碴桥面		梁别 / 方向	有碴桥面	
	a	T_0		a	T_0
沿梁高	5	20 ℃	沿梁高	—	—
沿梁高、梁宽	7	16 ℃	沿梁宽	7	16 ℃

箱梁沿板厚的温差曲线按下式计算：

$$T_y' = T_0' e^{-a'\delta}$$

式中，$T_0' = T_0(1-e^{-ay})$；δ 为箱梁板厚(m)；a' 按表 1-6 取值。

表 1-6　沿板厚温差曲线的指数值 a' 的取值表

板厚 δ/m	0.16	0.18	0.20	0.24	>0.26
a'	15	14	13	11	10

b.降温温度荷载。

箱形梁沿顶板、外腹板、板厚温差曲线的指数值 a' 采用 14，相应的 T_0 采用 −10 ℃。这就是说，在考虑降温过程中，由于底板终年不受日照，所以底板的温度比较低，故顶板、腹板温度略高于底板，因此在降温过程中，底板内外表面的温度变化也较小，可略去底板微小温度变化的影响。

1.4　本书研究的主要内容

①通过试验测试两跨连续钢筋混凝土箱梁和钢筋混凝土简支箱梁的有关温度效应(包括温度场、温度应力和温度位移)。

②进行有关钢筋混凝土箱梁桥温度场及温度应力的充分的理论分析。

③编制有限元程序求解钢筋砼箱梁桥二维不稳定温度场，计算最不利温差分布的温度应力，并通过将实测值与程序计算值进行比较分析，检验程序的正确性。

④通过计算机程序的模拟分析来确定有关参数的合理取值，以确定合理的温度场。

⑤分析各物理及几何参数对温度场及温度应力的影响，从而对钢筋混凝土箱梁桥的温度裂缝的控制提出一些参考性意见。

⑥结合已有的分析结果，为相关规范的修订提供合理的建议。

第 2 章　钢筋砼箱梁日照温度效应试验研究

2.1　试验模型的设计

2.1.1　模型尺寸

本试验实测了钢筋砼箱梁(简支梁和连续梁)的温度场和温度效应(包括温度应力、温度位移及支座反力的变化)。简支梁模型采用 1∶6 实桥模型,连续梁则采用在简支梁跨中加中间支座来实现。

模型梁高 0.4 m,顶板宽度 2.4 m,总长 4.55 m,两端各设 75 mm 厚横隔板,横隔板中部设 100 mm×100 mm 通气孔,端支座中心线距离梁端 100 mm。模型截面尺寸及配筋如图 2-1 所示。

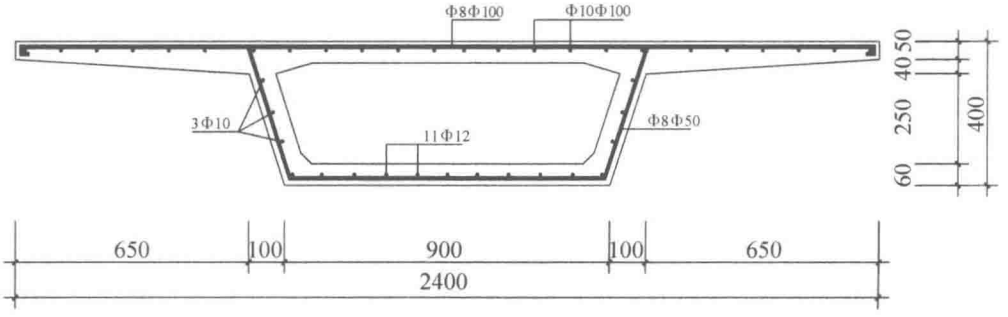


图 2-1　模型截面尺寸及配筋图(单位:mm)

2.1.2　模型材料

混凝土:实测混凝土底板抗压强度为 35.0 MPa,腹板及顶板抗压强度为 40.3 MPa,底板劈裂抗拉强度为 3.06 MPa,腹板及顶板劈裂抗拉强度为 3.33 MPa,混凝土弹性模量 $E=3.3\times10^4$ MPa,混凝土比热 $c=0.9$ kJ/(kg·℃)$=0.215$ kcal/(kg·℃),热传导系数 $k=3.46$ W/(m·℃)$=2.98$ kcal/(mh·℃),密度 $p=2460$ kg/m^3。

钢筋:Φ12 纵筋屈服强度 $f_y=360$ MPa,极限强度 $f_u=534$ MPa;Φ10 纵筋屈服强度 $f_y=265$ MPa,极限强度 $f_u=451$ MPa;Φ8 钢筋屈服强度 $f_y=232$ MPa,极限强度 $f_u=390$ MPa。

2.1.3　模型制作

由于模型壁板很薄,因此采用自流平混凝土(掺加减水剂)分两次浇筑,于 1999 年 8 月 8 日先浇底板,1999 年 8 月 12 日再浇腹板、顶板和横隔板。

2.2　测试仪器及测点布置

2.2.1　测试仪器

本试验采用镍铬康铜热电偶配用 UJ-36 型直流电位差计测得温度,采用 10 m×4 m 纸基

应变片配用 YJ-26 型直流式应变仪测得混凝土的应变。位移采用百分表测得，支座反力采用临时标定的压力盒测得。

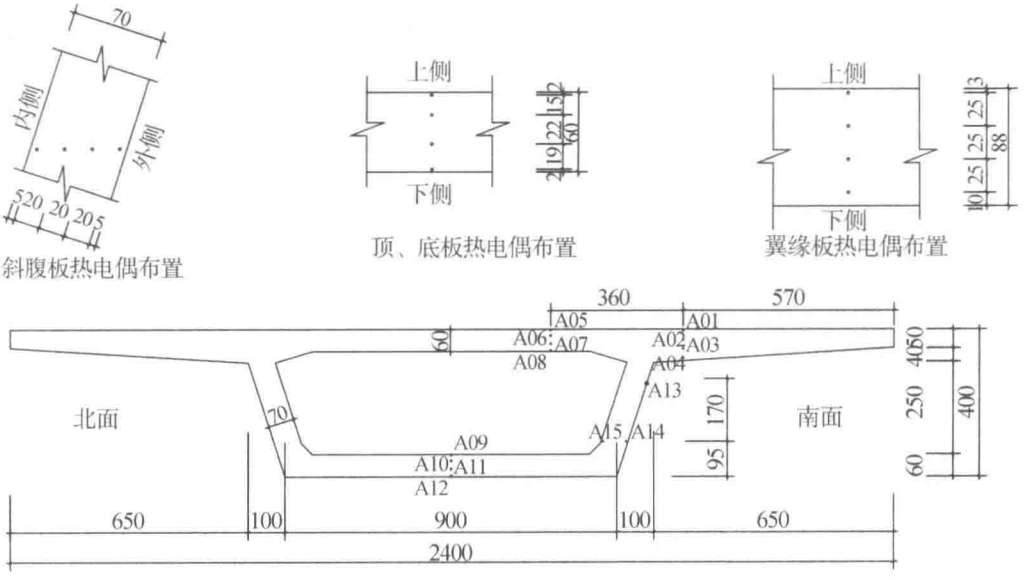
2.2.2 测点布置

各测点布置如图 2-2 所示。测点说明如下(本试验先测连续梁，撤除其中间支点后再测简支梁)。

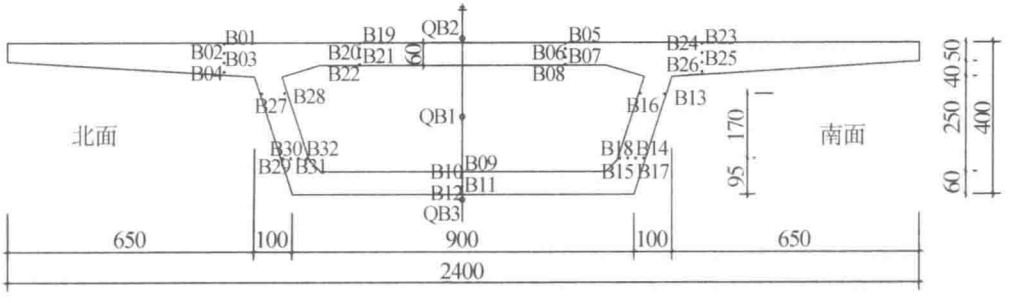
①热电偶 A01～A15 及 B01～B32 分别测试 A，B 截面处混凝土内温度，B33 及 B34 分别测试 B 截面处顶板主筋上、下表面处温度。QA1 及 QB1 分别测试 A，B 截面处箱内气温，QB2 及 QB3 分别测试模型箱顶及箱底气温。

②HA01～HA15 及 HB01～HB22 分别为 A，B 截面处混凝土表面应变片，其中标有“.”的表示顺桥向的纵向应变片，而标有“—”者表示横向应变片。

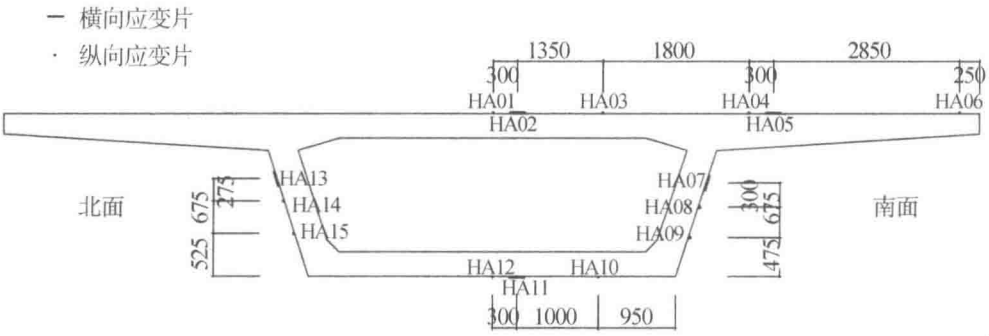
③压力盒 R1～R4 测简支梁支座反力，R1～R6 测连续梁支座反力。百分表 S1，S2 及 S8 测简支梁倾角位移；S1，S2 和 S8，S9 测连续梁倾角位移；S3～S7 测梁的竖向位移。



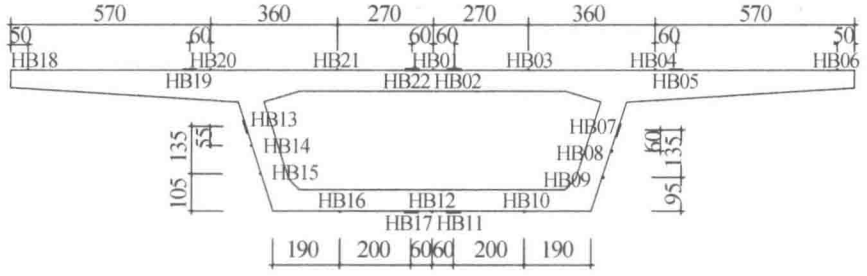
(a)模型 A-A 截面热电偶布置图



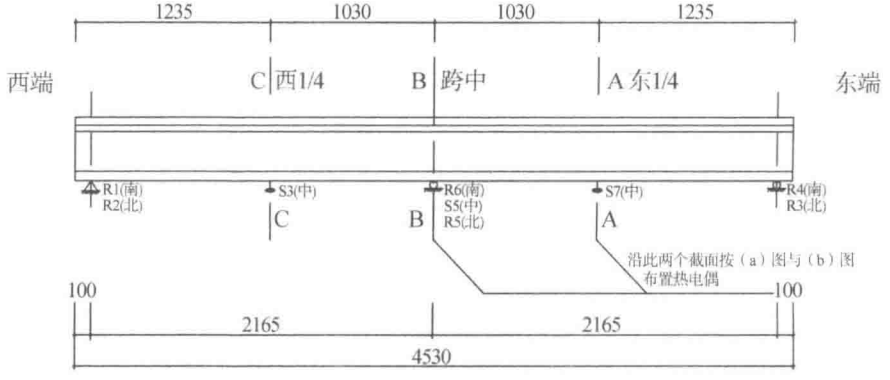
(b)模型 B-B 截面热电偶布置图



(c)模型 A-A 截面混凝土应变片布置图



(d)模型 B-B 截面混凝土应变片布置图



(e)模型立面尺寸及百分表布置图

图 2-2　模型测点布置图(单位:mm)

2.3　试验的基本情况

本试验各数据采取的时间性要求很严,要求各数据基本上同时测得。因此,测试时力求做到全面铺开,专人负责测试各类数据。因测试温度时涉及电位差计调平问题,故同时采用了两台直流电位差计,六个人分两组测取温度,连续 24 小时每隔两个小时采集一次数据,每次测试控制在 10 分钟内测完,因此,可近似认为各数据是同一时刻测得的。

测试温度时,采用现场冰点补偿法,即采用同材质的两段导线从冰瓶将电位差引至电位差计测得。由于很难保证冰瓶的绝对冰点以及两台电位差计之间不存在读数差异,本试验采用