



[德] F.凯尔别克著

太阳辐射对 桥梁结构的影响

中国铁道出版社

太阳辐射对桥梁 结构的影响

〔德〕F.凯尔别克著

刘兴法等译

中国铁道出版社

1981年·北京

内 容 简 介

本书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、结构表面温度和各种计算常数，并求得结构构件内由此引起的不稳定温度分布与相应的温度应力。书中列举了箱梁与双肋板梁二个有代表性的实例，还介绍了实测资料。

本书可供结构工程技术人员、研究人员以及高校结构专业师生参考。

本书系由邓应祥、赵中芸同志译出初稿，刘兴法同志参照初稿进行了重译，经姚玲森同志校阅后定稿。

Einfluß der Sonnenstrahlung

bei Brückenbauwerken

Dr.-Ing. Fritz Kehlbeck

WERNER-VERLAG 1975

太阳辐射对桥梁结构的影响

〔德〕F.凯尔别克 著

刘兴法 等译

中国铁道出版社出版

责任编辑：王能远

封面设计：赵敬宇

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

中国铁道出版社印刷厂印

开本：787×1092 $\frac{1}{16}$ 印张：6.25 字数：130千

1981年7月第1版 1981年7月第1次印刷

印数：0001—2,000册 定价：0.80元

译 序

近二十年来，有关机械、航空等方面的热应力专门著作，已有几十种。但就桥梁结构的热应力专著来说，尚属第一本。随着桥梁结构向大跨、整体、轻型、高强方向发展，这一问题，无论在运营、施工中，对于确保桥梁结构的强度、刚度耐久性都是很重要的。

本书从热辐射的基本原理出发，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、结构表面温度和各种计算常数。并求得结构构件内由此引起的不稳定温度分布与相应的温度应力。书中列举了箱梁与双肋板梁等二个有代表性的实例，还介绍了实测资料，具有一定的实用价值，可供结构工程技术人员、研究人员以及高校有关专业的师生参考。

承姚玲森同志为本书作了全面细致的校核，谨在此致谢。

译 者

1979年6月

13-106

序

至今，对于钢筋混凝土与预应力混凝土结构受温度与辐射影响所引起应力的计算，还很少注意。鉴于结构在出现细毛发裂纹时，自应力以及约束应力均已显著降低。因此，在一切有关的规程中，对于有约束应力的情形，只要求检算简单的破损安全度。

预应力混凝土桥梁结构的损坏（其中首先是箱梁结构腹板中的裂纹），往往可归结于辐射的影响。由于人们极少在比较长的时期内去测量结构各构件最不利状态的温度以及应力的变化过程，所以在大多数情况下，只能对所发生的应力作粗略的估计。

著者在这篇博士论文中表明：至少对于欧洲地区，可以比较正确地预料结构任意部位的构件内，在考虑阴影作用下的最不利温度以至于应力的变化过程。选择箱形梁作为例子，所求得的自应力与约束应力是极其有用的，它们可能为制订规程指出方向。

新近的比较计算指出，在测量桥梁结构的温度时，一定要同时测量靠近表面的风速。这一影响是不小的，而且风速的大小几乎无法估计。

K. W. 皮格尔

1974年10月于汉诺威

前 言

本书论述大气对桥梁结构中应力影响的定量分析。这种应力特别与太阳直接辐射、天空辐射、大气逆辐射* 和周围环境辐射以及与相应的反射部分有关；研究上述影响对于任意朝向和构造的结构物表面的作用，确定由此引起的不稳定热流、与此热流相应的位移、或由于位移受阻碍而产生的应力。

本书对于箱形截面的和双肋板梁截面的桥梁结构进行了详细计算。这些计算结果指明：在德国规程中屡次提到可以忽略温度验算之处，并非都有充分的理由；另一方面，对于大气影响所引起的温度约束应力，也不应估计过高。

我感谢工学博士、教授、K. W. 皮格尔先生对这一工作的鼓励，他始终为学术讨论作准备并提供为制作图表材料所必需的人员上的支持。

我也同样感谢工学博士、教授、F. 哈弗尔朗特先生，他使我进一步增强了从事这一工作的决心并且通过多次与我学术交谈和提供论文材料给予帮助。

F. 凯尔别克

1974年10月于汉诺威

* 译注：大气逆辐射，即大气长波辐射。因为大气层对于来自地表面的长波辐射几乎全部吸收，转变成成为本身的热能，并以长波辐射形式向外辐射，其中一部分又投射回地球表面，所以把这部分的大气长波辐射，称为大气逆辐射。

目 录

符号表	1
引言	5
第一章 热辐射原理	6
第二章 日过程辐射气温的确定	9
§ 1. 太阳直接辐射	9
一、地球外部太阳辐射在大气中的透射	9
二、太阳直接辐射能量对任意测定表面的影响	13
§ 2. 散射辐射	15
一、天空辐射	15
二、太阳辐射和天空辐射的反射	16
§ 3. 无云天的全辐射	19
一、全辐射的波动	19
§ 4. 大气逆辐射	19
§ 5. 地表环境辐射	22
§ 6. 结构构件的反射	25
§ 7. 蒸发与凝结	29
§ 8. 热交换	29
一、辐射热交换	30
二、对流热交换	32
§ 9. 外界气温的日过程	36
一、确定辐射日气温的前提	36
二、外界气温的描述	37
三、同已发表资料的比较	38
四、外界气温描述的论证	40

五、连续周期的天数	40
六、山区外界气温的日过程	41
七、辐射日的外界气温特征	41
§ 10. 桥梁结构表面的热辐射计算	42
一、行车道面的辐射气温	43
二、底板外表面的辐射气温	44
三、悬臂顶面的辐射气温	44
四、腹板外表面阴影部分的辐射气温	45
五、受日照腹板表面的辐射气温	45
六、比较分析	46
第三章 通过蓄热构件的热流	52
§ 1. 理论基础	52
§ 2. 微分方程的解法说明	55
§ 3. 单层构件的一维解	56
一、一般解的阐述	56
二、实数解的阐述	59
§ 4. 几个特征值的意义	63
一、全热阻的板层	63
二、全蓄热的板层	64
三、热交换的薄层	65
四、矩阵元素的直观意义	65
§ 5. 渡越时间的估计	68
§ 6. 边界条件说明	69
§ 7. 多层构件的一维解	72
一、一般解的阐述	72
二、实数解的阐述	74
§ 8. 材料系数的确定	77
§ 9. 温度分布的描述	81

§ 10.	两平板构件角隅区的热流和温度分布的估算	91
§ 11.	对比研究	94
第四章	由于一维不稳定温度分布所引起应力的计算	102
§ 1.	假定前提	102
§ 2.	自应力的确定	103
一、	平面应力状态	103
二、	平面变形状态	106
三、	自应力的描述	107
§ 3.	约束内力的确定	112
一、	采用的简化方法	114
二、	桥梁纵向的变形和应力的计算	115
三、	纵向变形和应力的描述	116
四、	桥梁横向约束内力的简化计算	123
五、	横向内力与应力的描述	124
§ 4.	双肋板梁截面行车道板中内力与应力的计算	130
一、	行车道板的温度约束弯矩	132
第五章	比较研究	135
§ 1.	计算系数	136
§ 2.	实测与计算的比较	138
§ 3.	由温度引起的应力 (1973年7月4日)	141
§ 4.	小结	144
第六章	结束语	145
第七章	展望	147
附录		148
参考文献		176
人名对照		187
地名对照		189

符 号 表

A_s	黑体吸收能力
A	灰体吸收能力
A_λ	带色体吸收能力
E_s	黑体辐射能力
E	灰体辐射能力
E_λ	带色体辐射能力
C_s	黑体辐射系数
C	灰体辐射系数
C_λ	带色体辐射系数
T	绝对温度
T_A	外界气温
T_v	辐射气温
T_o	构件的安装温度
J_o	太阳常数
J	地表面的太阳直接辐射
J_h	水平表面上的太阳直接辐射
J_β	任意测定表面上的太阳直接辐射
J_{abs}	吸收的太阳辐射
J_{str}	散射的太阳辐射
H_h	水平表面上的天空辐射
H_β	倾斜表面上的天空辐射
R_h	水平表面上短波辐射的反射
R_β	倾斜表面上短波辐射的反射
R_{BK}	建筑物上短波辐射的反射

- R_a 大气长波逆辐射的反射
- $R_{a\beta}$ 倾斜表面上大气长波逆辐射的反射
- R_{B1} 建筑物上长波辐射的反射
- G_a 大气逆辐射
- $G_{a\beta}$ 倾斜表面上的大气逆辐射
- U 地表环境的辐射
- U_{β} 倾斜表面上地表环境的辐射
- B 建筑物的辐射
- q_a^m 考虑水蒸气、臭氧、氧气和气溶胶吸收的透射系数
- q_a^m 考虑纯大气分子的散射的透射系数 (瑞利扩散)
- q_{δ}^m 考虑在气溶胶中扩散的透射系数
- $q_a^m \cdot \tau_L$ 总透射系数
- ϵ_a 大气逆辐射的辐射系数
- ϵ_u 地表环境的辐射系数
- ϵ_{B1} 建筑物的辐射系数
- r_{uk} 地表环境的短波反射系数
- r_{Bk} 建筑物的短波反射系数
- r_{B1} 建筑物的长波反射系数
- T_L 林克氏浑浊度系数
- a_w 表面的方位角
- a_s 太阳方位角
- β 表面与水平面的夹角
- h 阳光与水平面的夹角, 即太阳高度角
- δ 太阳倾角 (即视赤纬)
- φ 表面位置的地理纬度
- λ 表面位置的地理经度
- MEZ 中欧时间
- WOZ 真地方时间

W	风速
α	总热交换系数
α_a	外部总热交换系数
α_i	内部总热交换系数
α_s	辐射热交换系数
α_h	对流热交换系数
λ	导热性
c	比热
ρ	密度
τ	时间
q	热流密度
D	热阻
S	层蓄热能力
θ	温度幅值衰减
Φ	相应的相位差
P	热流幅值衰减
Ψ	相应的相位差
α_T	热膨胀系数
E_b	混凝土的弹性模量
G	剪切模量
μ	泊松系数
ε	应变
φ	转角
M_T	由于温度引起的弯矩
N_T	由于温度引起的轴向力
Q_T	由于温度引起的剪力
σ_{T_e}	构件的温度自应力
σ_{TE}	整个体系的温度自应力

$\sigma_{n\varphi}$ 由于构件转动受约束引起的温度应力

σ_{nx} 由于构件在 x 方向的应变受约束引起的温度应力

σ_{ny} 由于构件在 y 方向的应变受约束引起的温度应力

σ_{Tx} 在 x 方向的温度应力

σ_{Ty} 在 y 方向的温度应力

$\Sigma\sigma_{Tx}$ 在 x 方向的温度应力总和

$\Sigma\sigma_{Ty}$ 在 y 方向的温度应力总和

其余符号均在文中说明。

引 言

无大型隔热装置的混凝土结构，经受着持续变化的大气影响，例如：太阳辐射和天空辐射以及外界气温的影响。太阳辐射与天空辐射的一部分从表面被反射，余下的部分被吸收并转变为热能，这部分就与外界气温相叠加。由此所产生的可观的表面温度，就产生热传导作用，主要为沿着结构构件的厚度传向温度较低处。由于在一天内不断变化着的表面温度，就沿厚度方向产生不稳定热流。在变形完全受到阻碍的情况下，应力就与由此产生的温度成正比。

相反地，如果设想某一结构构件是完全自由支承的，则它在各个方向将按与不稳定热流相应的恒定的温度分布产生变形。只在变形受阻止的情况下，这种温度分布才会按与变形成正比的关系产生约束内力和约束应力。在不稳定的与相应恒定的温度分布之间存在的温度差，导致沿板的厚度保持平衡的自应力状态，它能达到相当大的应力值。

为了能比较可靠地说明问题，看来就要在确定沿厚度方向温度分布的同时，广泛地测定表面温度。这种测量工作必须对全联邦范围内有代表性的桥梁进行，最好也在全欧洲地区同时进行。然而它们需要耗费大量的物力与时间。而且即使全年进行这种测定的话，遇到极端温度的可能性也很小。因此，根据桥梁所在的地点和位置，借助已有的气象测量资料来掌握确定表面温度所必需的各种大气影响，就显得很有意义。

此外，如果在表面积很大的结构构件内一维不稳定温度分布可以用数学方式来描述的话，则不稳定温度分布产生的应力就可能用弹性薄板理论进行计算。

第一章 热辐射原理

热辐射是一种电磁波，它由辐射体发出，以直线形式传播，并在遇到物质时又部分地转化为热量。射至物体表面的辐射，一部分渗透到物质的内部，其余部分则通过表面的反射或散射被射回到空间，它称之为反射能力 r 。进入物体内部的辐射，其一部分在物体内渗透，这部分即所谓透射能力 q ，另一部分则通过介质中所具有的物质而转变为另外一些形式的能量，例如热量。这种能量转化称为吸收能力 A 。

假如总的光谱分布所积聚的辐射能量等于 1，则可按能量规律写出以下的关系式：

$$A + r + q = 1 \quad (1)$$

吸收能力 A 总是小于 1。在极端情况下，当 $A = 1$ 时，我们就得到所谓的黑体 $A = A_0$ ，它能全部吸收所有的波长。如果只吸收全部波长中的一部分而其余波长以同样强度被反射，则人们就称此为灰体。如果偏于反射一定的波长，那么称为带色体。灰体的吸收能力 A ，可以与上述的解释相似，同黑体的吸收能力 A_0 作比较来加以说明。

一切具有吸收能力 $A > 0$ 的物体，除了接收辐射的能力之外，根据长波范围内的温度，尚具有发出辐射的特性，这可用辐射能力 E 来表示。这就意味着，在这种波长范围内，周围的辐射场与物体自身辐射之间有相互影响。根据克希霍夫定律^[11]，对于任何一种物体来说，发射辐射与吸收辐射彼此之间具有一定的关系：

$$E_0 = \frac{E}{A} \quad (2)$$

E_0 为黑体的辐射能力。

现若引入任何一种物体的辐射系数为：

$$\varepsilon = \frac{E}{E_s} \quad (3)$$

则方程式 (2) 也可写成下列形式：

$$\varepsilon = \frac{E}{E} \cdot A = A \quad (4)$$

即是：在黑体辐射的总波长范围内，物体的辐射系数在同一温度下与它的吸收系数相等。

斯坦范与鲍茨曼 [11] 曾有规律地得到了黑体的辐射能力，它与克希霍夫定律有关，也适用于灰体辐射。它表示，绝对黑体的总辐射与绝对温度 T 的四次方成正比。

$$E_s = C_s \left(\frac{T}{100} \right)^4 \quad (5)$$

C_s 是黑体的辐射系数，其值为：

$$C_s = 5.775 \cdot 10^{-4} \text{W/m}^2 \text{K}^4$$

这一规律也可足够近似地应用于所有 $C > 3.5 \text{W/m}^2 \text{K}^4$ 的固体 [15]。如方程式 (2) 与方程式 (5) 等同，则可得灰体的辐射能力：

$$E = A \cdot C_s \cdot \left(\frac{T}{100} \right)^4$$

$$E = C \cdot \left(\frac{T}{100} \right)^4 \quad (6)$$

此处：

$$C = A \cdot C_s \quad (7)$$

就是灰体的辐射系数。

在具有与波长 λ 有关的吸收能力 A_λ 的带色辐射体中，辐射系数 C_λ 以及辐射能力 E_λ 均与波长有关。

$$E_\lambda = C_\lambda \cdot \left(\frac{T}{100} \right)^4$$

$$E_\lambda = A_\lambda \cdot C_s \cdot \left(\frac{T}{100} \right)^4 \quad (8)$$

由此可以通过辐射能力明确地确定在长波温度辐射范围内物体与它周围的相互关系。

为了掌握辐射对于物体的影响，可以将各个辐射源的有效强度和辐射计算中的空气温度进行对照，并且确定辐射气温 T_r 作为计算值。它表示一种假想的外部气温，即在这种气温下未受辐射的物体具有与在相应外部气温下经受辐射影响时同样的热传导。

首先考虑波长为 $\lambda = 0.3 \sim 2.0 \mu\text{m}$ 的短波辐射。它由太阳直接辐射和散射的天空辐射所组成，并称之为全辐射。这种辐射经由地球的各大气层、气溶胶*层和云层而被显著地减弱、它被结构物本身和地面环境所反射。所以需要考虑到下列各项因素：构件的表面特征、方位、倾斜度以及各种地面环境，如云层凝聚范围、绿色山谷、降雨、下雪等等。在进行日过程内的这些研究时，应特别考虑到季节性和与之相联系的太阳位置。

除了明显的短波范围的辐射影响以外，结构物、环境和大气本身主要在波长为 $\lambda = 6 \sim 60 \mu\text{m}$ 的长波范围内起着温度辐射体的作用。如同温度辐射体这个词已经表明的那样，这种辐射与各种介质的温度有关。结构物与环境的温度基本上又取决于需作详细分析的表面特征。

大气温度主要受大气层吸收太阳辐射的影响。在地表附近，增加了由于对流而从辐射表面带至空气的热量。这样被加热的空气物质，在气流运动的情况下，将其中含有的热量带走，而另外的空气物质又补充其位置。虽然有关这种流体力学问题的文献非常多〔11〕、〔12〕、〔13〕，但对于我们感兴趣的这些过程，几乎还不能从计算上来掌握。

*译注：气溶胶即大气中的悬浮微粒