

水泥混凝土路面 设计理论、方法和参数研究

主持单位：交通部公路规划设计院
同 济 大 学

一九八六年十月

水 泥 混 凝 土 路 面
设计理论、方法和参数研究

总 报 告

主持单位：交通部公路规划设计院 同济大学*

参加单位：

南京工学院*

西安公路学院

哈尔滨建筑工程学院*

湖南大学

中山大学

北京工业大学

北京建筑工程学院

空军工程学院

河北工学院

上海城市建设学院

空军后勤部工程设计局*

中国民航总局机场设计院

广州军区空军后勤部设计室

北京军区空军后勤部设计室

大庆油田科研设计院

大庆石油化工设计院

第二水泥工业设计研究院

北京市钢铁设计研究总院

西安市建筑设计院

南京市勘测设计院

南京市市政工程公司

南昌市城市规划管理设计室

浙江省仙居县公路段

浙江省衢县公路段

浙江省交通设计院*

台州公路总段

绍兴公路总段
安徽省公路研究所
安庆公路总段
广东省交通科学研究所
韶关地区公路局
江苏省交通厅工程管理局*
交通部第二公路勘察设计院*
交通部第一公路勘察设计院
交通部重庆公路科学研究所
西安公路研究所
辽宁省交通勘察设计院
北京市市政工程研究所*
北京市市政设计院
上海市市政工程研究所*
上海市城建局市政工程设计院
上海市市政工程设计院
广州市市政工程研究所
广东省韶关市公路局
广州军区空军后勤部87434部队
安徽省公路勘测设计院
镇江市公路管理处
浙江省金华地区公路总段
浙江省嵊县公路段
天津市市政勘测设计院
海军工程设计研究局
南京市公路管理处

* 为分题负责单位

目 录

总报告	(1)
-----	-------

第一部分：设计理论

分题报告之一：荷载应力分析	(25)
---------------	--------

分题报告之二：温度应力分析	(40)
---------------	--------

第二部分：设计方法

分题报告之一：考虑荷载应力和温度应力综合疲劳作用的混凝土路面结构设计 方法	(51)
--	--------

分题报告之二：旧水泥混凝土路（道）面强度评定和加厚层设计	(57)
------------------------------	--------

分题报告之三：以抗折强度为指标的水泥混凝土混合料配合比设计	(76)
-------------------------------	--------

第三部分：设计参数

分题报告之一：混凝土疲劳方程	(95)
----------------	--------

分题报告之二：轴载换算系数	(104)
---------------	---------

分题报告之三：轮迹横向分布系数	(111)
-----------------	---------

分题报告之四：动荷系数	(118)
-------------	---------

分题报告之五：温度梯度值	(124)
--------------	---------

分题报告之六：水泥混凝土抗折强度和抗折弹性模量	(134)
-------------------------	---------

分题报告之七：混凝土面板下地基的综合模量	(140)
----------------------	---------

分题报告之八：水泥混凝土路面防冻层厚度	(151)
---------------------	---------

分题报告之九：接缝传荷系数	(159)
---------------	---------

《水泥混凝土路面设计理论、方法和参数研究》

总 报 告

一、概 况

随着我国社会主义建设事业的发展,在我国公路、城市道路、工矿企业道路以及机场的修建中,水泥混凝土路面的修建里程日益增多。根据我国近年来原油生产发展情况,国家供应足够数量的路用优质沥青还有相当大的困难,因此,修筑水泥混凝土路面是今后改善提高路面质量的重要途径之一。

根据对水泥混凝土和沥青混凝土两种高级路面进行的经济与能耗分析研究⁽¹⁾,认为水泥混凝土路面的建筑投资费用虽较沥青混凝土路面为大,但前者的养护费用省。如按30年计算期内的总费用现值计,在大多数情况下(当年贴现率取值不超过12%时),前者总是比后者小。当采用更长的路面计算年限时,经济效益更大。当分析比较两种路面能量总消耗时,研究表明,即使仅计入沥青本身能量的一小部分,如10%,沥青混凝土的能量超过水泥混凝土。

由此可见,水泥混凝土路面使用年限长,养护费用小,材料质量和来源较易保证,能量总消耗小,它能较好地适应现代化交通建设和符合节约能源的需要。因此,开展水泥混凝土路面设计理论、参数和方法的研究,提高设计精度和施工质量,克服部分路面板过早疲劳断裂和某些接缝错台行车颠簸等缺点,有很重要的实际意义。

根据本课题各研究单位于1979年以来组织力量在北京、上海、西安、广州等市,浙江、安徽、广东等省对水泥混凝土路面的使用情况进行的实地调查研究⁽²⁾,看到由于各地采用的设计标准不一样,施工方法不同,体现在路面使用质量上区别较大,既有成功的经验,也有失败的教训。总结经验教训,对于面板的断面形式及厚度,板的平面尺寸,混凝土的强度要求,基层设置,接缝布置与构造等,都能提出一些有益的指导性意见。在施工方法和科技水平方面,也有不少新的进展,例如,很多单位在水泥混凝土板下不再采用砂垫层,而是采用坚实稳定的石灰煤渣、石灰土、水泥稳定碎石等做基层,它对加强路面,防止唧泥翻浆,延长路面使用寿命,起着极积有利的作用;在构造和工艺上采用延长胀缝间距、成条浇捣和机械锯缝等,提高了路面平整度和增加了邻板对荷载的传递能力。但对于以上这些效果较好的经验,尚缺乏力学机理上的分析说明,有些还没有明确的定量指标和肯定的做法。因此,全面地从理论、实验和方法多方面对水泥混凝土路面开展系统的研究,显然是必要的。

交通部1978—1985年科技发展规划中安排了“水泥混凝土路面研究”课题,提出了在78—80年的前三年,着重研究设计理论,初步提出设计方法和参数,探讨某些施工养护问题;在81—85年后五年的第二阶段中,进一步深入、完善设计理论、方法和参数。这项任务由交

通部公路规划设计院和同济大学共同主持,组织了设计、科研和大专院校40多个单位参加,到目前为止,已按期完成。

第一阶段前三年规定的研究任务于1980年底基本完成,并于1981年进行了总结整理,写出了本课题第一阶段的研究总报告^{〔3〕},以及十个专题报告^{〔4-13〕}和一个调研报告^{〔2〕}。1981年底在交通部公路局主持下召开了研究成果评议会议。在研究工作中获得较大进展的成果有:可供生产实践使用的按有限元分析得出的荷载应力计算图;我国若干典型地区路面板温度状况变化规律和温度应力计算方法;刚性路面下地基综合模量的选用;以及几项主要设计参数,如混凝土强度参数、动荷系数、疲劳抗力安全系数等。评议会议肯定了这些主要成果,并认为:“其理论研究的成果,具有国内先进水平,并已接近同类项目的国际水平;在设计参数方面,提出了符合我国实际情况的初步成果和建议值,填补了国家空白”。同时也指出:“在该课题中,板角的应力分析和部分结合双层板的应力计算还不够完善,理论计算还缺乏足够的验证;在设计参数方面,限于现有的试验手段和方法,有的还不够完善;这都有待于今后进一步加以改进和完善”。

1982—1985年,根据原规划中第二阶段的任务,参按第一阶段研究成果的评审意见,开展了补充研究,进一步完善了设计理论、方法和参数。在这一阶段研究工作中,获得较大进展的成果有:参虑徐变影响的温度应力计算与试验验证;考虑荷载应力和温度应力综合疲劳作用的结构设计方法;改善对地基反力处理和采取厚板原理对板角应力的有限元分析和试验验证;旧机场道面强度评定、双层板应力分析和加厚设计;以及若干设计参数,如混凝土面板下地基综合模量,全国范围内混凝土面板的温度梯度值,轮迹横向系数等。

综合两个阶段的全部研究成果,汇总写成本研究成果总报告,并分别就设计理论、设计方法和计算参数三个方面写成14个专题报告。

八年来各参加单位和人员对本研究课题的各专项写有很多详细研究报告,总计有150余篇。

研究工作期间,曾先后在浙江、安徽、江苏、江西等省修筑了各种类型的水泥混凝土试验路面,进行了观测分析^{〔14〕},获得了一定程度的初步验证。

二、面板应力分析

(一) 荷载应力分析

1、理论分析

水泥混凝土路面的理论分析可以采用两种不同的地基假设,即垫层系数(Winkler)假设和弹性半无限体假设;前者忽略了土基颗粒间的横向联系,后者假设了土体是各向同性的弹性体。按变形曲线和支承反力分布两项指标用实验资料对比分析,可以发现后者更符合于实际情况。再者,我国自50年代以来,已习惯于采用模量 E 作为刚性路面的刚度指标,以及为了与柔性路面设计中的回弹模量这一材料刚度指标取得一致,故确定仍采用弹性地基假设。

在过去的年代里,采用弹性地基板理论,仅能解算无限大板,或者承受轴对称荷载的圆

板。对于板边和板角承载时,仍然借用了垫层地基板(即Westergaard解)的计算方式。

现代快速电子计算机的发展,使我们有可能采用有限单元法或有限差分法来解算弹性地基上有限尺寸的矩形混凝土板。采用这种方法,不但能算出荷载在有限矩形板上任意位置时(包括板中、板边和板角)板内的应力和位移,而且对于板与地基部分脱离接触以及邻板之间具有一定传荷能力等特殊情况,也能进行分析计算。

在本研究课题中,采用了两种有限元法(即十二项多项式的非协调型位移模型和假设应力函数的杂交模型),样条有限元法(三次样条函数)和有限差分法等对弹性地基上的有限大矩形板进行了计算。通过对比分析,查明四种方法都可得到相近的结果。为提供可付生产设计使用的图表成果,在进行大量计算时,采用了有限元的位移法^[4]。

有限元位移法是一种近似计算方法,经与无限大板和半无限板(板边)的精确解析结果对比时,可以看出在恰当划分单元,控制好单元尺寸和承压面尺寸的比例时,其精度完全可以满足工程设计的要求。其中挠度计算的精度可控制在1%以内,板中受荷时最大应力的精度可控制在2%以内,板边受荷时最大应力的精度在5%以内。

2、板角应力

当荷载作用于板角时,按上述统一图式进行有限元分析时,所得计算结果很难与实测值相吻合,挠度曲线过于平缓,应变计算值偏小。在第二阶段的研究中,参虑到当荷载作用于板角时,板角处边缘反力分布将产生一定程度的集中,如图1所示。由于板角地基反力的分布变化急剧,在进行有限元分析时,尽可能对板角处采用不等分单元,并将角单元反力分布假设由阶梯状改进为连续曲面状,并考虑由地基反力产生的结点弯矩影响,以减少由于简化而产生的过大误差^[15]。经过改善地基反力模式处理,挠度曲线与应变值与实测值相吻合情况有了较大的改善。从某一算例可得挠度值较地基反力模式未改善时的计算值要大19%,应变值大14%。

为进一步改善有限元计算效果,论文^[16]采用了Mindlin厚板理论和三角形单元有限元法,论文^[17]采用了三角形Reissner板单元的有限元分析,计算结果都有改善,且能分析斜交、锐角、开孔等异形板。

以上进行的有限元分析都证实了双轮加载时,板角应力仍小于板边应力^[4,15],因而它对厚度计算并不起控制作用。因此,建议对板角应力可不做验算。但在生产实践中,经常发生自由板角易于破坏的实际情况。究其原因,这是由于板角下地基累积塑性变形^[18]、板角翘曲或表面干缩等原因造成板角处地基支承部分脱空,在车轮荷载下引起较大应力所致。以上这种复杂的实际情况在现有弹性地基板计算理论中未能反映,故今后仍需继续这

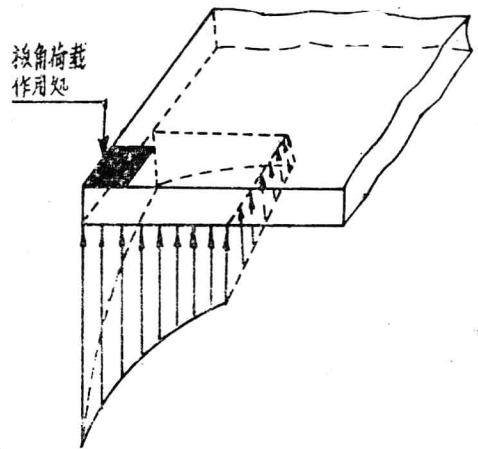


图1 板角地基反力分布

方面的研究。在目前条件下,在实际工作中,建议应注意自由板角和边缘处土基的强度和压实度,以及基层的坚实和边缘加宽,并建议一般仍需在自由板角隅加设钢筋。

3、试验验证

为验证有限元位移法解算结果同实际相符的程度,在室内对土基上的模型板和足尺板进行了荷载试验。测定了板中、板边缘中部和板角隅三种荷载位置时的挠度曲线和应变曲线,详见第一部分设计理论中第一分题报告“荷载应力分析”。

板中加载试验表明,如果把土基的回弹模量值(按常规法实测值)乘上2—4倍,则实测的挠度曲线和应变曲线同有限元理论解的结果对比,两者吻合得很好。刚性路面下土基回弹模量之所以应提高若干倍数,主要是土基实测回弹模量时的加载图式与刚性路面下土基的实际受荷状态并不一致。后者属分布面积较大的盆状压力,土体中单位压力较前者要小得多,由于土体实际上的非弹性性质,模量值就应当提高。板边加荷试验表明,当把土基回弹模量乘上1.4—3.0倍,也可得到实测值和理论曲线的良好吻合。至于实际设计时应采用的刚性路面下回弹模量的增长系数,则在第四节“计算参数”中“地基回弹模量”一节中另作说明。

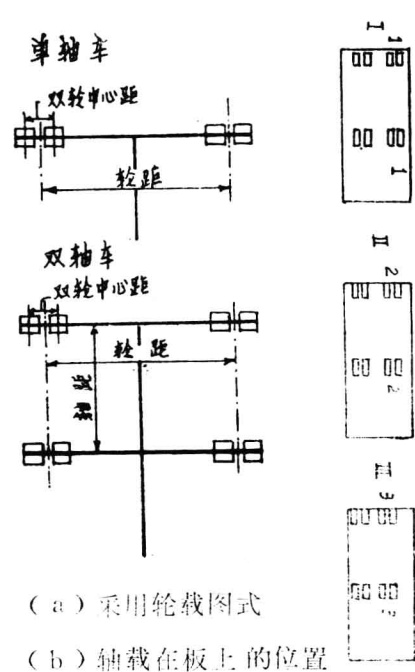
板角加荷试验表明,在第一阶段研究中,试验实测值与弹性地基假设下的有限元解并不一致。^{〔4〕}第二级研究中,采用了改善地基反力模式的有限元程序进行计算,不相符合情况有了较大改善^{〔15〕}。

4、实用图表

在路上行驶的绝大多数载重汽车,有单后轴的和双后轴的,在每一轮轴上都为两组轮荷载。在过去的计算方法中,对双轮荷载都按面积相当的单圆荷载处理。理论分析表明,按单圆荷载计算所得的应力较双轮荷载应力在板中偏大13%;在板边偏大20%以上。这次在编制实用设计图表时,都按双轮荷载计算(在有限元分析中,按双方形荷载计算),见图2(a),并根据路上常见车辆的各种参数变动范围进行了计算。

在大量计算中,运用了有限元法可按任意荷载位置计算应力的有利条件,在一块矩形板上,在横向选择了三个轮轴位置I、II、III,在纵向选择了横缝边缘和板中间两个位置,如图2(b)所示。在计算中考虑了另一侧双轮的附加影响。通过对各个特征点在各种不同荷载位置下的应力计算与分析对比,选用了两种临界荷载位置。

(1)后轴一侧双轮作用于自由横缝边缘的中部,此时没有计入另一侧双轮的附加影响(因为叠加后反使应力减小)。这种荷位情况适用于横缝为无传荷能力的接缝时。



(a) 采用轮载图式

(b) 轴载在板上的位置

图2 编制实用图表时考虑的荷载图式

(2) 后轴整个轴载作用于板的中部, 此时计入了另一侧双轮的应力叠加影响。这种情况也适应于当接缝处有能保证完全传荷能力的设施时。

按以上两种临界荷位编绘了单后轴和双后轴的计算用图四张(见“荷载应力分析”分题报告)。图3所示为单后轴荷载应力计算用图。从计算图中, 可根据板厚按采用的模量比和荷载全重, 查出板中拉应力; 或反之, 可按容许应力设计所需混凝土板厚。

对矿山公路所用的特重汽车, 选择了四种国产车型, 编绘了应用计算用图^[19]。

对于多轮组多轴的平板车, 由于各轮组的应力叠加时有正有负, 互相抵销, 经过验算, 其最大应力不会超过单轴双轮组所引起的应力, 所以推荐可近似地按两组双轮的载重量查取单后轴计算用图^[20]。

对于履带车辆, 由于着地面积大, 板内产生的应力较小, 履带—50和履带—60荷载对一般刚性路面设计都不起控制作用^[21]。对通过特重的履带荷载, 则应进行个别验算。

对于飞机场刚性道面的厚度计算, 也已采用有限元法编制了部分机型的计算用图^[22]。

5、邻板具有传荷能力时的应力计算

具有邻板的板边缘, 不论采用缩缝、胀缝或纵缝, 都具备一定的传荷能力, 故可以不必完全按自由板边状况验算应力。

接缝传荷的力学机理较复杂, 传荷能力的评定指标也较难确定。

当接缝有100%传荷能力时, 论文^[23]认为横向力传递比例 E_L 为50%, 采用多次迭代法作有限元分析解, 得出板边的最大应力接近于板中加载时的最大应力(差值在1%以内)。论文^[22]认为有完全的传递能力可视为相当于铰接装置, 此时板与板之间能完全传递垂直力而不能传递弯矩, 由此按三块和九块铰接板作了有限元解分析, 得出结果表明板边的最大应力不会大于板中加载时的最大应力。

当接缝仅有部分传荷能力时, 论文^[23]按不同的横向力传递比 E_L 用多次迭代有限元法计算了板的最大应力 σ_j , 然后按下式算出传荷能力 E_σ 。

$$E_\sigma = \frac{\sigma_{\text{边}} - \sigma_j}{\sigma_{\text{边}} - \sigma_{\text{中}}} \quad (1)$$

式中 $\sigma_{\text{中}}$ 为板中应力, $\sigma_{\text{边}}$ 为自由板边的应力。

计算结果^[1]表明, 所得 E_σ 值与 $2 \times E_L$ 极为接近。

研究中采用了接缝两侧边缘横向力与挠度成比例的假设, 确定了传荷能力与接缝两侧挠度之间的如下关系式。

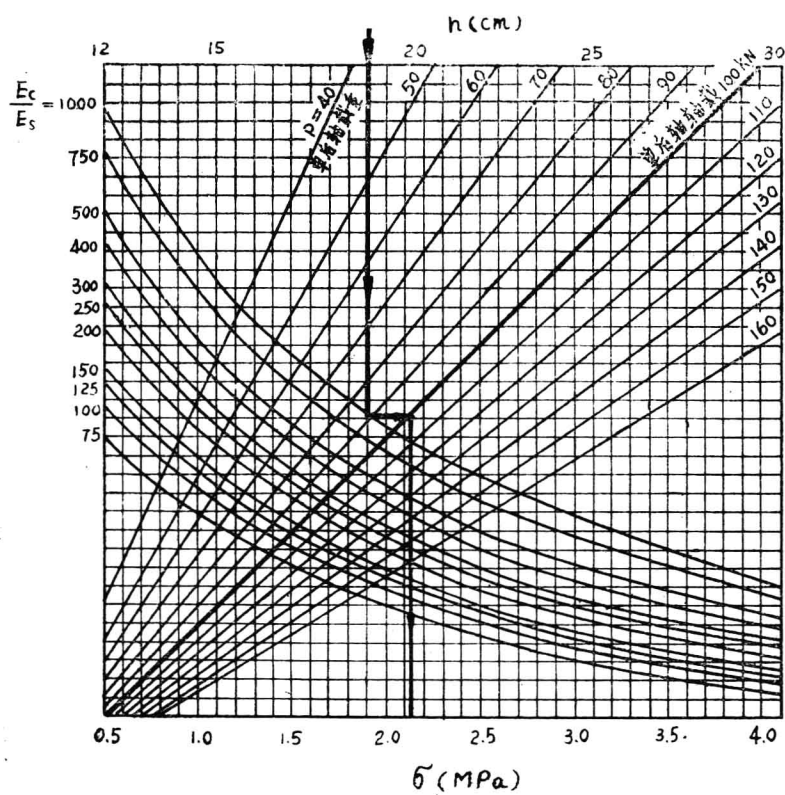
$$E_\sigma = 2 E_L = 2 \times \left(\frac{W_1}{W_1 + W_2} \right) \quad (2)$$

上式中 W_1 和 W_2 相应地为接缝两侧未受荷板和受荷板边缘的挠度值。

根据式(2)的原理, 可在实际使用的具有各种接缝条件的路段上, 采用实测挠度的方

法确定传递能力系数 $E\sigma$ (见“计算参数”之四)。在已知接缝的传递能力系数后,根据(1)式,对接缝处受荷载时的最大应力 σ_j 可按下式求得:

$$\sigma_j = \sigma_{\text{边}} - E\sigma(\sigma_{\text{边}} - \sigma_{\text{中}}) \tag{3}$$



(a) 单后轴轴载作用于板长中部时的应力计算图

图3 刚性路面荷载应力实用计算图

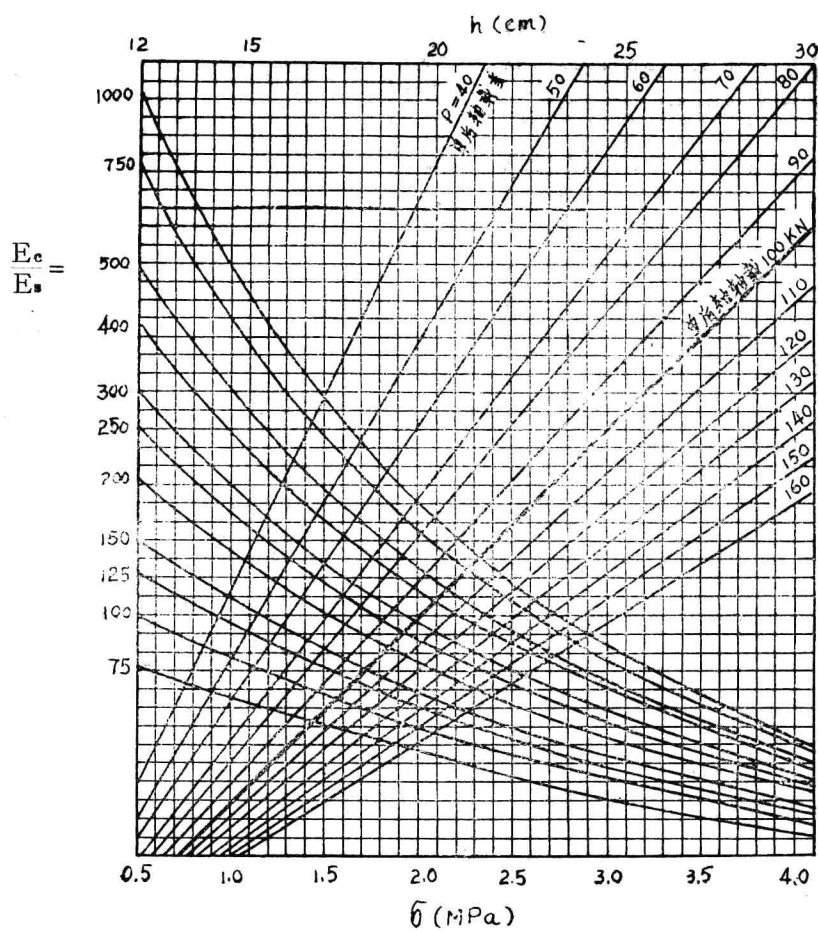


图3 (b) 单后轴双轮作用横缝边缘时的应力计算图

(二) 温度应力分析

1、温度翘曲应力的有限元分析

为保持与荷载应力计算方法一致性,开展了有限元法对温度翘曲应力的分析研究⁽⁸⁾。分析计算时,采用了半无限弹性地基假设,也考虑了自重约束的影响以及板与地基部分脱空时对翘曲应力的影响,并探讨了温度变化与轮载共同作用下的应力变化。研究认为,因温度梯度作用而出现的同地基部分脱空现象将会由于同时承受轮载作用而部分消失,而在温度作用下由于自重约束而增加的翘曲应力又适当地与剩余脱空现象的影响相抵消。综合考虑的结果,在一般计算温度翘曲应力时,可免去考虑自重约束和地基部分脱空的影响,而不致于产生过大的误差。

根据有限元法的计算结果,编绘了半无限地基板翘曲应力系数曲线,如图4所示。制作该曲线时,按上述分析结论,未考虑板自重约束和地基部分脱空的影响。使用该曲线时,可按下式计算板的相对刚度半径:

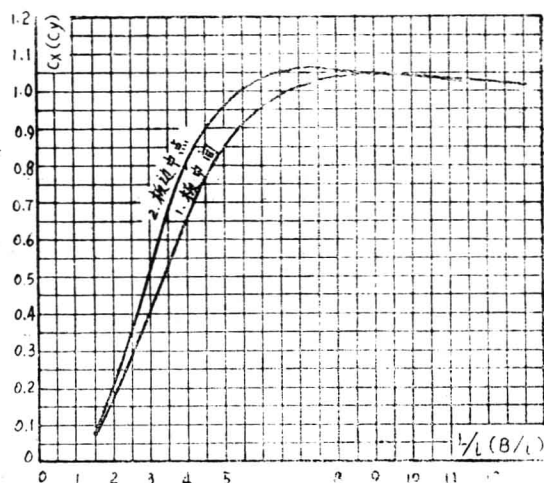


图4 半无限地基板温度翘曲应力系数曲线

$$L = \sqrt[3]{\frac{E_c h^3 (1 - \mu_o^2)}{6 E_o (1 - \mu^2)}} = 0.53h \sqrt[3]{\frac{E_c}{E_o}} \quad (4)$$

在上述中选中了地基的 $\mu_o = 0.35$, 混凝土的 $\mu = 0.15$ 。

从曲线图中按相应的 L/l 或 B/l 值选取 C_x 或 C_y 值。 L 为板的长边长度, B 为短边长度。然后按惯用的 Bradbury 公式计算翘曲应力, 即:

在板中部 (用图4中曲线1):

$$\sigma_x = \frac{E_c \cdot \alpha \cdot \Delta t \cdot h}{2 (1 - \mu^2)} (C_x + C_y \cdot \mu) \quad (5a)$$

$$\sigma_y = \frac{E_c \cdot \alpha \cdot \Delta t \cdot h}{2 (1 - \mu^2)} (C_y + C_x \cdot \mu) \quad (5b)$$

在板边缘 (用图4中曲线2):

$$\sigma_o = \frac{C_x \text{ (或 } C_y) \cdot E_c \cdot \alpha \cdot \Delta t \cdot h}{2} \quad (6)$$

在式(4、5、6)中: h 为面板厚度; E_c 和 E_o 为混凝土和地基的模量; α 为混凝土的线膨胀系数; Δt 为板内的温度梯度, 其值见“计算系数之三”一节。

2、实验验证与徐变影响

为验证理论分析的正确性,在 $6\text{m} \times 4\text{m} \times 22\text{cm}$ 的混凝土板经受一定的温差作用时,采用标距为 50cm 的手持应变仪进行了翘曲应力的试验测定⁽²⁴⁾。在将实测数据与理论计算结果相对比时,就产生了如何确定公式(4、5、6)中的混凝土弹性模量 E_c 和地基弹性模量 E_0 的问题。如果仍按实测到的原始 E_c 和 E_0 值计算,则得到了较实测值偏大较多的结果。

在第二阶段研究工作中,又在合肥郊区公路上修建了五种不同板长的试验路段 100m ,采用了标距为 50cm 的手持应变仪和 4cm 长的应变片两种方法施测了温度应力,获得了较为系统的实测资料⁽²⁵⁾。将实测值与理论计算值相对比,只有把土基的承载板实测模量乘上 0.35 倍,才能使两者满意地接近。故建议了将 E_0 降低到 0.35 倍承载板实测模量值,然后再运用上述式(4、5、6)计算,可以作为计算翘曲应力的一种实用方法,目前这种方法已被城市道路设计规范稿所采纳。

理论计算值与实测值所以不符的根本原因在于温度应力施加过程远远慢于荷载应力,而地基和水泥混凝土面板都有徐变特性,在缓慢的温差变化过程中经历着应力松弛。因此,采用了徐变力学理论分析混凝土板的翘曲应力^(26, 27)。同时对混凝土梁式试件以及四种不同类型的基层和土基作了实验室徐变试验,测定各种材料的徐变系数随时间变化的规律。对弹性地基板考虑徐变后的温度应力计算是采用有限元法计算而得的⁽²⁷⁾。将计算结果与合肥试验路实测值相对比,获得了更好的吻合。为进一步验证,85年又在上海金山县试验路上作了实测验证⁽²⁷⁾,同样获得满意的结果。

除徐变影响外,板内非线性温度分布所产生的内应力也促使翘曲应力减小,对厚板这一点更为明显。论文⁽²⁸⁾将内应力影响也纳入了计算体系,最后提出便于生产使用的简化公式如下:

在板中部(用图5中曲线1):

$$\sigma_x = \frac{E_c \alpha \cdot \Delta t \cdot h}{2(1 - \mu^2)} (D_x + \mu D_y) \quad (7a)$$

$$\sigma_y = \frac{E_c \alpha \cdot \Delta t \cdot h}{2(1 - \mu^2)} (D_y + \mu D_x) \quad (7b)$$

在板边缘(用图5中曲线2):

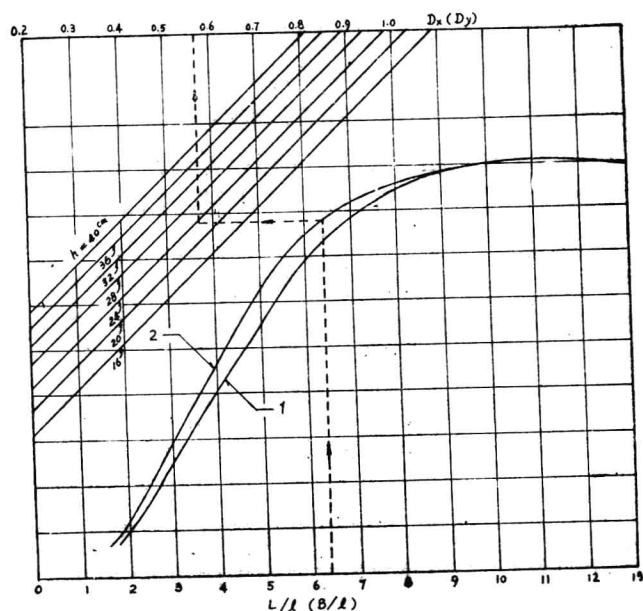
$$\sigma_o = \frac{D_x \text{ (或 } D_y) \cdot E_c \cdot \alpha \cdot \Delta t \cdot h}{2} \quad (8)$$

式中 D_x 、 D_y ——考虑了徐变影响和内应力影响后的翘曲应力系数,可根据 $L/1$ 、 $B/1$ 和板厚 h 由图5查得。

3、热胀翘曲稳定性分析

不设或减少水泥混凝土路面的胀缝,有利于改善路面质量,但必须分析在高温季节由于混凝土热膨胀所产生的内应力是否会引起屈曲失稳。论文⁽²⁹⁾根据铁木辛柯弹性稳定理论,论文⁽³⁰⁾采用热压屈曲非线性有限元分析,进行了专项研究,并都做了室内模型板试验验证。

研究表明,路面会否屈曲失稳,与胀缝的间距无关。其主要因素是板的厚度、施工季节



1—E 地基板中点； 2—E 地基板边缘中点；

图 5. 考虑徐变和内应力影响后的弹性地基板温度翘曲应力系数曲线。

与高温季节之间的温度差，竖曲线半径，缩缝间距以及施工和养护质量。路面过薄由于刚度小易于屈曲失稳。对20cm厚以上在平直路段上的路面，在5℃以上施工，热季平均板温最大值不超过50℃时，只要注意施工和养护质量，不设胀缝不至于会发生屈曲失稳的现象。在不能满足上述条件之一时，可按下式计算确定施工时的容许最低温度 T_o 。

$$T_o = T_{\max} - \Delta T - \Delta t_1 + \Delta t_2 \quad (^\circ\text{C}) \quad (9)$$

式中： $T_{\max}$ ——当地高温季节最大平均板温（℃）；

ΔT ——路面允许最大板温差，由表 1 查得（℃）；

Δt_1 ——混凝土硬化和干缩引起的修正值，变化于 5—15℃，一般采用 10℃；当大气相对湿度大、混凝土中水泥用量少且水灰比低、板较厚时用低值，反之取高值。

Δt_2 ——在凸形竖曲线路段上当半径较小时加入的修正值（℃），由表 1 查得。

表 1

板 厚	不同缩缝间距 l 时路面允许最大板温差 ΔT （℃）			不同竖曲线半径 R 时的修正值 Δt_2 （℃）		
	$l = 4.5\text{m}$	$l = 5.0\text{m}$	$l = 6.0\text{m}$	$R = 1000\text{m}$	$R = 1500\text{m}$	$R = 2000\text{m}$ 以上
20cm	46 (27)	43 (25)	38	9	3	与平坡段 相同
24cm	51 (32)	48 (29)	43	11	3	
28cm	56 (36)	54 (33)	49	14	4	

表 1 是按保证路面使用 3—5 年后缩缝间路面板能起单体作用的条件制订的。如果由于缩缝间距过短,缩缝切口过浅或养护不当等,可能造成双块板粘连共同拱起的情况,则宜采用表 1 中括弧内的数值,以策安全。

在长大纵坡上,由于路面重力在下坡方向的分力会助长屈胀的产生,须特别注意,或是加设胀缝,或是作出专门的分析^{〔31〕}。

(三)、双层板的应力分析

当原有机场混凝土道面或公路混凝土路面的强度不能满足使用要求,需要加厚改建,就遇到弹性地基上双层板的应力如何计算以及原有旧路面的强度如何评定两个问题。为此,专门进行了理论分析和测试研究工作,详见《旧混凝土道面的强度评定与加厚层设计》专题报告。

在双层板理论研究方面,分别就结合式、分离式和部分结合式三种类型作了理论分析,求得了数值解,制作了厚度设计诺模图。

对弹性地基上结合式双层板,采用了三层体系弹性理论(上、中层间结合,中、下层间滑移)作了解析解。又采用有限元法分别就分离式和结合式按二种临界荷载图式(后轴一侧双轮作用于横缝边缘中部以及后轴整个轴载作用于板中)作了数值计算,绘制了诺模图。

对于部分结合的双层板,在第二阶段研究工作中有了不少新的进展。除采用结合(摩阻)系数 K 的方案^{〔32〕}外,还采用了国外推行的哥德曼力学模型^{〔33〕}。当考虑到实际施工中,理想的分离式是不存在的,往往采用砂砾稳定材料作为夹层,论文^{〔34〕}采用了考虑具有非线性夹层的双层道面有限元程序,并作了数值计算。不论采用部分结合法或夹层法,都有按实验确定材料的结合参数问题,通过实测反算,已经获得了一些概略参数值。此外,论文^{〔35〕}还提出了当旧道面有裂缝(或接缝)时荷载应力的有限元法计算方法。论文^{〔36〕}提出了双层水泥混凝土路面温度翘曲应力的计算方法和数据。

为验证上述理论分析,在室内做了模型的和足尺的双层混凝土板受力性能试验,在施工现场也做了试验,详见验证分析报告,在施工现场也做了试验,详见验证分析报告,^{〔37, 38〕}一般都得到了满意的验证效果。

三、设计方法

(一)考虑综合疲劳作用的设计方法

1、混凝土的疲劳特性

路面经受多次车轮荷载重复作用,必须研究混凝土的疲劳破坏规律。在第一阶段研究工作中做了地基上足尺板的板角疲劳破坏试验,建立了强度折减系数 K 与重复作用次数 N 之间的经验公式^{〔13〕}。由于试验条件限制和工作量过大,对板边和板中的疲劳试验还没有进行。考虑到板角试验结果与国外简支小梁疲劳试验所得结果无大明显差异,因为都是一样经受着某种重复的应变作用。为鉴别国产软炼新标准水泥的疲劳特性,在第二阶段研究工作中,在实验室内进行了 $15 \times 15 \times 55\text{cm}$ 的混凝土小梁疲劳试验^{〔12〕}。将该试验结果按单对数

的形式进行整理，可以得到下式：

$$\frac{\sigma}{\sigma_s} = 0.885 - 0.063 \lg N \quad (10)$$

式中N为重复荷载作用次数， σ 为重复应力， σ_s 为混凝土的抗弯拉强度。上式中已减去了三倍回归误差。

2、轴载换算公式

路面上实际经受的是具有不同轴载的混合交通，为计算各种轴载重复作用的累计影响，在第一阶段研究报告中，建议采用Miner定律叠加各级荷载时疲劳抗力的利用率。由于对每级轴载都要进行查图计算，然后叠加，并经历几次试算，未免繁琐。论文〔39〕采用回归方法整理有限元法分析应力的结果，得到如下的应力计算公式：

$$\sigma = A \times \frac{P^u}{P^m} \quad (11)$$

式中P为轴载重，h为板厚，A、m和n为回归常数。然后将小梁疲劳试验结果按双对数的形式进行整理，得到下式：

$$\lg N = 1.171 - 19.115 \lg \frac{\sigma}{\sigma_s} \quad (12)$$

将应力公式（11）代入疲劳方程（12），按等效疲劳开裂的原则，可以推演出如下的轴载换算公式〔39〕。

$$\frac{N_1}{N_2} = \alpha \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{18} \quad (13)$$

上式用于单后轴车载换算时，将 $\alpha = 1.0$ 。如果要把双后轴换算为单后轴，经分析推算，得出按板边情况取 $\alpha = 3.8$ ，按板中情况取 $\alpha = 0.23$ 。

在设计中建议采用单后轴100千牛作为标准轴载，则可将各级轴载数按式（13）换算为标准轴载数，然后累加。采用轴载换算后累加的方法可以取得与运用Miner定律相同的结果。由于已全部换算为100千牛单后轴标准轴载，因而在绘制实用计算图时，可仅保留图3中100KN轴载的一根线，对双后轴车载由于可用 α 值换算为单轴车载，计算用图在实用上也就不再需要了。

3、考虑荷载应力和温度应力综合疲劳作用的设计方法

荷载应力和温度应力综合作用的应力谱随时间作随机变化，其一般形式如图6所示。其中荷载应力相应于交通量分布，温度应力相应于温度梯度，又各自随年、月、昼夜产生着一定规律的随机变化。

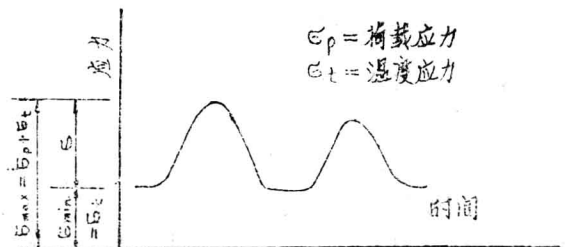


图 6 应力随着时间的随机变化