

摘要

近年来，随着行车荷载的增加，早期修建的水泥混凝土路面板底脱空严重，引起水泥混凝土板断裂或错台，许多水泥混凝土路面面临大修、改造。本文调研了国内外对水泥混凝土路面加铺层的研究成果，对脱空水泥混凝土路面加铺层进行研究。

首先，调研各种结构的加铺层使用状况及特点，结合广西实际，提出水泥混凝土路面加铺水泥混凝土板补强以及级配碎石加铺层方案。通过对广西全桂路改造工程中多处水泥混凝土路面板下脱空状况的研究，获得脱空形态的分布规律，提出“脱空度”这一概念，用三维有限元方法定量分析脱空水泥混凝土板体受力状况和缩缝钢筋传力杆对于提高脱空水泥混凝土路面寿命的影响。

其次，结合 FWD 等无损检测技术对路面参数的获取，探讨基于脱空度评价旧水泥混凝土路面复合式加铺层的设计方法，建立一套道面无损检测评价和加铺层设计系统。

级配碎石材料具有明显的应力非线性特性，结合 FWD 模量检测数据，采用三维非线性有限元程序分析级配碎石加铺层的应力、应变情况。

介绍了应力吸收复合夹层（ISAC）防止反射裂缝这一理论，利用断裂力学-有限元方法分析其力学作用机理。

最后，通过试验路验证脱空水泥混凝土路面加铺的结构设计方法，对旧板灌浆，复合夹层施工工艺和施工控制进行了研究。

关键词： 脱空度 应力吸收复合夹层 级配碎石 罩面 钢筋 无损检测 设计方法 非线性 灌浆

Abstract

The pavements constructed in early years are mainly Portland cement concrete pavements, in recent years, with the increase of traffic load and running speed, pumping area beneath the slabs increases which lead slabs crack or fault, many pavements are faced with reconstruction. Referring to the research result of overlay on old cement concrete pavements, this paper develops investigation on overlay on pumping cement concrete pavement.

To begin with, developing investigation on using status of all types structure of overlay, put forward the project that reconstruct new cement concrete slabs on old pavements. Because of pumping area beneath slabs which seriously affect the life of pavements, Through the investigation of pumping area beneath cement concrete pavement slabs of QUANGUI expressway alternation project in GUANGXI municipality, the distributing regularity of pumping area is obtained. putting forward a new concept “pumping magnitude”. Using three-dimension finite element method, analyzing stress of pavement slabs with pumping area, and also analyzing the effect of reinforced steel bar.

Secondly, confirming the design indexes of overlay on old pavements, then using three-dimension finite element method to analysis the stress of the overlay. Combining with non-destruct test technique, such as FWD, parameters of old pavement are obtained, developing research on the design method of the overlay which base on pumping magnitude, establishing a set of pavement test appraisal and overlay design system.

As inelastic property of gravel stone is mostly depended on it's grade, in order to predigest stress calculation , taking inelastic theory to analysis stress.

This paper puts forward interlayer stress absorbing composite to resist reflection cracking which based on the study of reflective crack in overlay. Then particularly introducing it's application in Illinois state, and analysis it's mechanism which based on fracture mechanism-finite element method.

In the end, the fatigue design method used in rehabilitation for old pavement has been validated through test road, then construction technique and control of interlayer stress absorbing composite and mortar grouting technique have been researched.

Keywords: Pumping magnitude; interlayer stress absorbing composite(ISAC); overlay; reinforced steel bar; non-destruct test; design method; inelastic; mortar grouting

表 格 目 录

表 1-1 旧水泥混凝土路面加铺层方案比较	11
表 1-2 广西水泥混凝土路面发展里程	14
表 1-3 广西路网工程使用状况调研表	15
表 2-1 相邻脱空水泥混凝土板号板实测弯沉数据 (单位: 0.01mm)	18
表 2-2 钻孔实测脱空高度数据表 (单位: cm)	18
表 2-3 脱空板横向接缝边缘弯沉测点弯沉值	19
表 2-4 板角脱空时板角作用荷载应力计算结果表	21
表 2-5 不同设计标准轴载下荷载疲劳应力计算系数	23
表 2-6 不同轴载作用下脱空水泥混凝土板底弯拉应力 (MPa) 计算表	23
表 2-7 温度应力回归系数表	24
表 2-8 不同脱空尺寸对脱空板底计算温度应力的影响 (单位: MPa)	24
表 2-9 荷载作用下不同厚度脱空板使用寿命计算表	25
表 2-10 传力杆对脱空混凝土板使用寿命的影响	31
表 2-11 全桂路试验段 FWD 路面结构强度检测汇总	33
表 3-1 不同罩面厚度的界面处最大剪应力	47
表 3-2 不同温度下不同剪切速率时不同层间接触的抗剪强度	47
表 3-3 不同层间材料试件在 0.12cm/min 剪切速率下不同温度时的抗剪强度	48
表 3-4 伊利诺斯州 ISAC 路用性能调查表	50
表 3-5 偏荷载作用下不同模量夹层的力学计算结果	51
表 4-1 国内外试验得出的回归参数 k_1 、 k_2 范围	56
表 4-2 不同三轴试验下模量计算值	57
表 5-1 全桂路错台检测结果	62
表 5-2 全桂路平整度检测结果表	62
表 5-3 全桂路断板率检测结果	62
表 5-4 压浆效果评定表	66
表 5-5 各项目部加铺层材料单价预算汇总表	69
表 5-6 土工合成材料及钢筋单价汇总表	69

图 形 目 录

图 1-1 “白+白”罩面结构示意图	2
图 1-2 错缝铺设水泥混凝土板示意图	3
图 1-3 “白+黑”罩面结构示意图	4
图 1-4 开裂路面结构分析图	4
图 1-5 ISAC 复合夹层结构示意图	8
图 1-6 “白+补强层+黑”罩面结构示意图	9
图 1-7 计算板角脱空尺寸与弯沉关系曲线	13
图 2-1 水泥混凝土路面脱空板板角测点平面分布图	17
图 2-2 脱空板钻孔分布图	18
图 2-3 水泥混凝土路面脱空板板缝测点平面分布图	19
图 2-4 脱空水泥混凝土路面板力学分析脱空模型简化	20
图 2-5 车轮荷载横向分布示意图	20
图 2-6 脱空水泥混凝土板临界荷位示意图	21
图 2-7 不同板厚的临界脱空高度	22
图 2-8 标准轴载作用下不同板厚时不同脱空度的板底应力	26
图 2-9 分离式钢筋单元模型	27
图 2-10 组合型钢筋单元	28
图 2-11 钢筋的等参四边形四结点单元示意图	29
图 2-12 钢筋传力杆力学计算模型	31
图 2-13 板沿接缝处断裂后传力杆对不同强度路表接缝处的弯沉影响	31
图 2-14 错缝铺设分离式加铺层计算分析模型	34
图 2-15 旧水泥混凝土路面复合式加铺层设计流程图	36
图 2-16 不同 E_s 时 20cm 厚分离式加铺层设计计算图	37
图 2-17 不同 E_s 时 22cm 厚分离式加铺层设计计算图	37
图 2-18 不同 E_s 时 24cm 厚分离式加铺层设计计算图	37
图 2-19 不同 E_s 时 26cm 厚分离式加铺层设计计算图	38
图 2-20 不同 E_s 时 28cm 厚分离式加铺层设计计算图	38
图 2-21 不同 E_s 时 30cm 厚分离式加铺层设计计算图	38
图 3-1 裂缝扩展模式	41
图 3-2 无限大板中的裂缝示意图	42
图 3-3 裂纹尖端积分回路	43
图 3-4 反射裂缝的产生	45
图 3-5 ISAC 剪切试验试样示意图	47
图 3-6 ISAC 抵抗反射裂缝试验装置	49
图 3-7 等参单元和四分之一节点奇异单元	51
图 3-8 高、低劲度夹层抵抗偏荷载作用示意图	52
图 3-9 沥青层底裂缝尖端应力强度因子 K_I	52
图 3-10 沥青层底裂缝尖端 J 积分	53
图 3-11 ISAC 复合夹层与单一高劲度土工夹层抗裂效果分析	53
图 3-12 ISAC 复合夹层与单一土工薄膜抵抗温度应力分析	54
图 4-1 级配碎石结构力学分析示意图	57
图 4-2 不同厚度沥青层底拉应力	57

图 4-3 不同沥青面层厚度级配碎石层底剪应力	58
图 4-4 不同厚度沥青面层最大弯沉	58
图 4-5 不同厚度级配碎石基层沥青层底拉应力	58
图 4-6 不同级配碎石基层厚度沥青路面最大弯沉.....	59
图 4-7 不同荷载作用下路面弯沉响应	59
图 4-8 旧水泥混凝土路面级配碎石加铺层结构设计思路流程图.....	60
图 5-1 全桂路主体工程维修方案流程	63
图 5-2 试验路 ISAC 复合夹层土工布自动摊铺图	67
图 5-3 试验路 ISAC 复合夹层自粘式玻纤格栅施工	67
图 5-4 试验路 ISAC 复合夹层沥青面层摊铺	67
图 5-5 试验路三辊轴施工钢筋传力杆支架布设示意图.....	68
图 5-6 试验路各加铺层造价图	70

东南大学学位论文独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得东南大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

研究生签名: 李海霞 日期: 2005.3.30

东南大学学位论文使用授权声明

东南大学、中国科学技术信息研究所、国家图书馆有权保留本人所送交学位论文的复印件和电子文档，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。本人电子文档的内容和纸质论文的内容相一致。除在保密期内的保密论文外，允许论文被查阅和借阅，可以公布（包括刊登）论文的全部或部分内容。论文的公布（包括刊登）授权东南大学研究生院办理。

研究生签名: 李海霞 导师签名: 李晓东 日期: 2005.3.30

第1章 绪论

§1.1 我国旧水泥混凝土路面结构的问题及现状

水泥混凝土路面是高等级公路路面结构的主要类型之一。近 20 年来，随着我国经济的迅速发展，公路交通量和轴载迅速增加，车速不断提高，对路面服务性能的要求随之相应提高。为了适应交通运输事业的发展，我国建造了大量的水泥混凝土路面，特别是交通部 1989 年推广国家科委科技工作引导性项目《我国水泥混凝土路面发展对策及修筑技术研究》成果以来，我国水泥混凝土路面修筑里程明显提高。我国大力发展水泥混凝土路面，对合理利用水泥资源、提高路面质量、缓解沥青供应不足的矛盾、增加高等级路面铺筑里程，提高运输能力，加快经济发展等都具有重要意义。

水泥混凝土路面是一种刚度大（称为刚性路面），扩散荷载能力强、稳定性好的路面结构。世界各国对水泥混凝土路面的修筑技术一直在进行研究和总结，使得技术上日臻完善，技术上显示出优势。路面工程与其它混凝土结构工程不同，它承受繁重的交通荷载，同时承受着动载疲劳、承受冲击荷载，还要承受温度、冰冻、湿度腐蚀等环境因素的破坏作用。在这种使用条件下，水泥混凝土路面需要严格的质量要求和良好的支撑条件。

毋庸讳言，我国水泥混凝土路面的建设质量良莠不齐。一些地方的水泥混凝土路面建设质量很好，节约了大量的维修费用。同时，也有一些地方建设的水泥混凝土路面质量较差，通车时间不长就发生较多破损，需要投入大量的人力、财力和物力修补。

我国目前建设水泥混凝土路面存在的问题主要归结为以下几点：

- 1) 路面结构设计的不尽合理：
 - a) 板厚：以往我国的水泥混凝土路面不论等级的高低，基本上都选择 24cm 的厚度，随着交通量和轴载的增加，新建水泥路面的板厚逐渐增加至 26cm 以上；
 - b) 缩缝传力杆的布设：我国绝大部分混凝土路面的横向缩缝均未设置传力杆。不设的主要原因是施工不便，无传力杆的旧混凝土面层在设置沥青混凝土加铺层时，往往会因接缝传荷能力差易产生反射裂缝而不得不加大加铺层的厚度。为了改善混凝土路面的行驶质量，保证混凝土路面的使用寿命，现行规范规定了在承受特重和重交通的普通混凝土面层的横向缩缝内必须设置传力杆。
 - c) 基层材料的选择不当和板底排水不畅：目前我国主要采用水泥或二灰材料处治的粒料基层，板底的排水条件不佳，在板边和板角容易出现唧泥现象使得混凝土板的支撑条件恶化。
 - 2) 施工维修方面的问题：
 - a) 水泥混凝土配合比材料的选择把关不严：如碎石经常含有过量的泥，水泥本身的安定性不佳等；
 - b) 现代化的滑模摊铺机还未在施工中得到广泛普及，路面施工的均匀性得不到保证；
 - c) 维修工作量巨大，维修工期长，且绝大多数的水泥混凝土板维修后失去了纵缝的传力杆，使得路面整体强度下降。
 - 3) 路面行驶车辆的超载问题：
 - a) 车辆超重超载严重，使得路面板早期破裂损害。
- 90 年代，随着水泥混凝土路面建设里程的增加和使用年限的增长，由板下脱空引起的

断板、错台及桥头搭板塌陷等病害越来越严重，成为公路管养部门的一大难题。根据实际调查，我国现已建成投入使用的水泥混凝土路面很快将进入大规模路况严重恶化期和大规模投资改造期，研究加铺层合理的结构和选择恰当的施工工艺非常迫切。

研究表明板下脱空是造成水泥混凝土路面大规模路况严重恶化的主要原因。国内外的工程界投入了大量人力、财力研究由板下脱空引起的断板、错台及桥头搭板塌陷等病害产生的机理和治理方法。迄今为止，水泥混凝土路面板下脱空及其治理相关的一些重要的工程问题仍然没有得到彻底解决，被认为是当今世界性的工程难题^[1]。

§1.2 国内外旧水泥混凝土路面加铺层的研究现状

目前，许多发达国家公路建设的重点都已从新建逐渐向现有公路的加铺改造转移。1976年美国提出4R计划（即罩面 Resurfacing，恢复再生 Restoration，修缮 Rehabilitation，改建 Reconstruction）就开始非常重视旧路的加铺改造工作了。可以预测，在不久的将来，我国高等级公路建设取得阶段性成果之后，重点也会从新建逐渐向现有公路的修复转移^[2]。

通过国内外的调研，旧水泥混凝土路面的加铺改造形式主要可以归结为以下3种结构形式：

- 1) 在旧水泥混凝土路面上加铺新的水泥混凝土路面罩面，简称“白十白”方案；
- 2) 旧水泥混凝土路面上直接或补强后加铺沥青混凝土面层，简称“白十黑”或者“白十补强层十黑”方案；
- 3) 旧水泥混凝土路面先碎石化后加铺面层，简称“碎石化十沥青混凝土路面”或者“碎石化十水泥混凝土路面”

以下分别就以上三种加铺方案分别进行介绍和论述。

§1.2.1 旧水泥混凝土路面加铺水泥混凝土罩面（以下简称“白十白”方案）

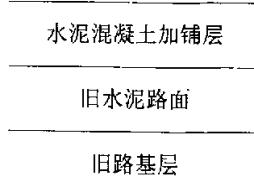


图 1-1 “白十白”罩面结构示意图

在“白十白”罩面中，按罩面与原有路面的层间粘结方式，分为结合式、分离式、部分结合式（图1-2）。也有的在加铺分离式水泥板补强后再加铺一薄沥青混凝土面层以改善行车性能和使用性能。

分离式（非粘结）加铺层对现有水泥混凝土路面状况较差的情况特别适用。与其它加铺结构形式相比它在加铺层施工前对现有路面的处治工作量较小，只需要对板下空隙较大处及活动的混凝土面板等进行修复。通过这些处治，可使加铺层及隔离层的厚度减薄，从而使工程总体较经济。实践证明，分离式混凝土路面加铺层在路面性能退化前的较长时期内，性能和费用都优于沥青加铺层。

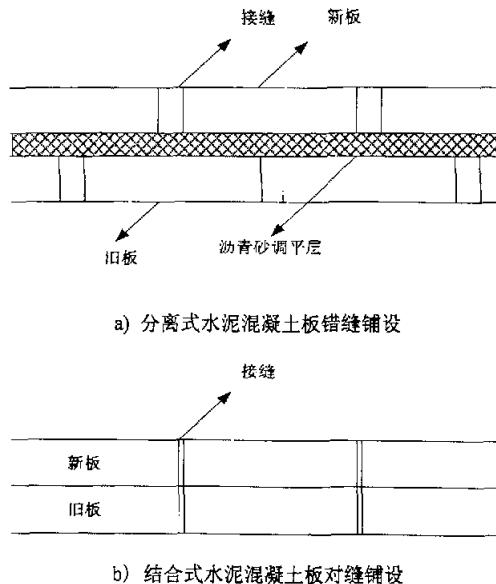


图 1-2 错缝铺设水泥混凝土板示意图

分离式混凝土加铺层可避免因路面重建而带来的费用大、工期长、对正常交通秩序干扰大等一系列问题。它可以在现有路面上直接施工，而不需要挖除全部现有的混凝土路面再对基层进行处治。加铺层混凝土的铺筑方法同新铺筑混凝土路面施工基本一样，可做成接缝设传力杆或不设传力杆的素混凝土路面，也可做成钢筋混凝土或连续式钢筋混凝土路面，施工便利。与挖除重建相比，虽然个别路段可能会遇到调坡或抬高桥面问题，但其费用常大大低于重建的费用。

旧混凝土面层为分离式加铺层提供刚度很大和抗冲刷能力强的地基，而由于设置了隔离层，阻止了反射裂缝对加铺层的影响，延长了路面的使用寿命。

相对来说，结合式加铺层对原有路面的处治要求较高，旧水泥混凝土路面的评价等级必须达到良以上，而由于旧混凝土板本身的接缝，使得其上的加铺层的反射裂缝问题相对比较严重，从而缩短加铺层的使用寿命。

对于分离式水泥混凝土路面加铺层来说，由于新板是一刚度较大的结构层，由旧水泥混凝土路面接、裂缝或错台引起的应力集中会使加铺层层底的弯拉应力非常大，因而，这类结构的设计控制指标是新加铺层板底的弯拉应力，即以新板的疲劳寿命为控制指标。

按照美国对已使用 2~39 年的分离式水泥混凝土加铺层的损坏调查，这类加铺层的主要损坏是角隅断裂和纵、横向裂缝，其错台量较新建混凝土面层小得多，平均值变动于 0~5.6mm 范围内。

工程实例：

长潭高速公路 2003 年 6 月份在旧水泥混凝土路面上做了 32cm 的分离式水泥混凝土板，有些路段做了缩缝设置钢筋传力杆的 18cm 水泥板补强后又加罩了 10cm 的沥青混凝土面层以改善路面的行驶质量，通车至今效果很好，几乎没有破坏。

§1.2.2 旧水泥混凝土路面加铺沥青混凝土罩面（以下简称“白+黑”方案）

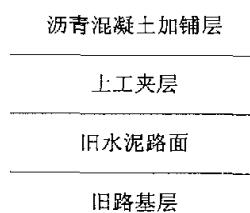


图 1-3 “白+黑”罩面结构示意图

旧混凝土面层的接缝或裂缝往往在通车数年内很快反射到沥青加铺层上。为了防止反射裂缝，最新 2002 年版的《公路水泥混凝土路面设计规范 JTG D40-2002》要求只有当旧混凝土面层的结构性损坏状况和接缝传荷能力均评定为优良或中时，并且对旧混凝土面层裂缝、错台和板底脱空等病害进行修复后，才能采用沥青加铺层。

防止和控制反射裂缝是沥青加铺层设计的重点。旧水泥混凝土路面上的沥青加铺层是一种特殊的路面结构，应力应变特性与一般的弹性层状体系有较大的差别^[4]。由于接裂缝的存在，在外力荷载作用下，沥青混凝土加铺层处于复杂的三维应力状态。车辆行驶经过不连续的板体时，沥青混凝土加铺层中由于裂缝两侧相邻板块产生竖向位移差，而出现较大的剪切应力。另外，由于路面暴露在大气中，受气温周期性变化的影响，沥青加铺层和旧路面板都会缩胀，并产生温度应力，见图 1-4。由于旧水泥混凝土路面的应力在接缝处不连续，沥青加铺层同时承受它本身以及旧路面所产生的温度应力。

在几十年防治反射裂缝的实践中，国内外的研究人员进行了大量试验，先后尝试了多种防治措施。这些措施涉及整个沥青罩面复合结构的各个层次，根据其结构层次的不同，大致可以分为：改善沥青混凝土罩面层性能、设置中间夹层和处治旧路面板。具体包括增加沥青混凝土罩面层厚度、应用改性沥青；SAMI、土工织物类、土工网格/格栅、粘结层；封填接缝、破碎、稳定旧路面板等。其中加筋沥青罩面和应力\应变吸收薄膜夹层一直是研究者关注的热点。

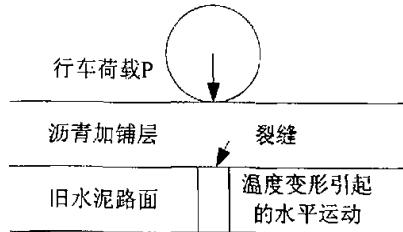


图 1-4 开裂路面结构分析图

1、改善沥青罩面层设计

在改善沥青罩面层设计中，通常采用两种方法，一是增加罩面层厚度，二是改变罩面层的材料组成。

研究表明，为了延缓反射裂缝，采用增加罩面层厚度的方法有一定的效果，但当厚度增加到一定程度时，这一方法就显得不可取了。美国俄亥俄州的试验表明，即使采用 12.7cm 的沥青混凝土罩面层，在不到一年的时间内，沥青面层已出现反射裂缝。美国公路协会的研

究报告指出,无论是4cm的薄面层,还是厚达25.4cm的特厚沥青混凝土面层,都出现不同程度的反射裂缝。在行车荷载的作用下,由于板底脱空等引起的较大的竖向位移在沥青混凝土面层中产生明显的集中应力,研究表明,当沥青加铺层厚度在12cm以内时,可以通过增加罩面层厚度的方法来延缓反射裂缝的发生,如果超过这一厚度,再用增加厚度的方法防治反射裂缝既不经济,效果也不会太好。

由于旧水泥混凝土面板本身强度较高,将其作为基层,在其上再加铺沥青混凝土这种路面结构,整体强度和刚度一般较大,但存在强度的局部不均匀,极易产生应力集中现象。低温时由于接缝处水泥混凝土板收缩,在沥青混凝土内产生的拉应力过大,造成沥青混凝土层破坏。为了减少和延缓反射裂缝的产生,这就要求加铺层的沥青混凝土本身具有较高的低温抗变形能力和抗拉、抗剪性能,同时又不能过分地降低沥青混合料高温稳定性。通常选择掺加改性剂的沥青上面层,改性沥青由于改性剂的存在,结构组成发生变化,形成相互贯穿的空间网络结构,使得改性沥青的力学性能、粘度、粘附性、感温性都有了明显改善,能有效地抑制反射裂缝的发展。它用做上面层,能提高行车舒适性,减少和延缓病害的产生,延长路面使用寿命,但明显增加了费用。

改变罩面的组成设计主要指改变沥青的性质和改变混合料中各集料的组成配比。现在道路改性沥青一般是指聚合物改性沥青,共分三类:热塑性橡胶类,如苯乙烯-丁二烯-苯乙烯(SBS),SBS具有良好的变形自恢复性和裂缝的自愈性;橡胶类,如丁苯橡胶(SBR),它是世界上应用最广泛的改性剂之一;树脂类,如乙烯-乙酸乙烯脂共聚物(EVA),聚乙烯(PE)等。其中,SBS的高温、低温、弹性恢复性能、感温性无论从哪方面讲,都有非常突出的优点,是PE和EVA所无法比拟的;PE仅仅在高温稳定性方面显示出较好的效果,但相比SBS还有很大的差距;EVA的高温稳定性不如PE,然低温性能较PE要好,但不如SBS。因SBS具有其它改性剂无可比拟的优点,近年来我国改性沥青主要以SBS为发展方向,应用其抵抗沥青混合料的高温车辙、低温缩裂,并达到变形的自恢复和裂缝的自愈目的。为了更好的发挥SBS的各种优良性能,其合理剂量应为3%-5%。

英国的Walsh等人使用EVA和SBS改性的沥青混凝土作为面层,有效的防止了反射裂缝的产生。波兰1992年铺设了两段试验路,A段为调平层+4cmSBS改性沥青混凝土+5cmSMA改性沥青混凝土;B段8cm沥青混凝土+5cmSMA改性沥青混凝土,使用至1995年9月无反射裂缝。

近年来开始应用沥青马蹄脂碎石混合料(SMA),它属于粗集料断级配密实沥青混凝土,空隙率为2%-4%,其中沥青通常使用SBS改性沥青,其特点是三多一少,即粗集料多、粉料多、沥青用量多,细集料少。与传统的沥青混凝土相比,SMA具有如下优点:首先是具有良好的表面功能,抗滑,车辙小,平整度高,噪音小,能见度好;其次是提高了路面抗变形能力,不透水,使用寿命长,维修养护工作量少,同时它可以减薄表面层厚度,易于施工和重建,对交通影响小。

但改性沥青的SMA造价很高,有人提倡SMA使用纯沥青,从而节省30%-40%的资金,同时,只在面层做一层4-5cm的SMA,来改善面层的抗变形和抗缩裂性能,这也能达到减少高温车辙和低温缩裂的目的,但效果还有待实践来检验。

2、格栅加筋及应力吸收薄膜夹层(SAMI)

近年来将土工合成材料用于路面加筋的例子越来越多,为防治反射裂缝提供了一个很好的技术选择。在应用加筋材料方面,早先用聚丙烯或尼绞线组成的格子片,插设在沥青混凝土层中的适当位置,以提高沥青混凝土的抗拉强度、抗开裂性、抗剪切能力以及增加对弯沉的适应能力和提高抗疲劳破坏的能力。后来,随着新材料的出现,采用的材料有:浸渍沥青玻璃纤维布、玻纤格栅(面层加筋)、浸渍沥青烧毛土工布,SAMI等。

通常有如下几种方式设置应力\应变吸收夹层:

- 1) 薄片法: 这种方法是采用聚丙烯或聚酯等非织品作为薄片。这种薄片 150°C 软化, 165°C 溶融, 含浸渍沥青 20% 以上, 路面板洒布 $1.13\text{L}/\text{m}^2$ 阳离子乳化沥青后, 将薄片附在混凝土板上, 作为上层沥青混合料的粘层, 其上沥青混凝土加铺层通常为 5cm 以上。从美国 84 万 m^2 的施工实践效果来看: 原有混凝土板与沥青混凝土层之间附着紧密, 路面强度增加。
- 2) 应力吸收薄膜夹层 (SAMI): 通常使用橡胶沥青, 在 180°C 左右, 以 $2.7\text{L}/\text{m}^2 \sim 3.6\text{L}/\text{m}^2$ 剂量洒布在混凝土板上, 在热状态下, 再用预拌的单粒粗砂以 $14\text{kg}/\text{m}^2$ 用量撒铺, 使其形成压实厚度为 9mm~13mm 的封层。厂拌 SAMI 是在 $137^{\circ}\text{C} \sim 149^{\circ}\text{C}$ 左右铺设, 用轮胎压路机碾压, 以免混合料粘轮, 其配合比通常采用沥青: 集料 = 10: 90 (最大)。

应用实例:

奥地利于 1989 年使用土工布, 旧路 21cm 水泥混凝土加铺 6cm 沥青混凝土, 使用 5 年后有反射裂缝。比利时在改性沥青混凝土下铺设无纺土工布、加筋网, 后者用钉固定在水泥混凝土板上, 沥青混凝土加铺层为 6cm+4cm, 使用两年半无反射裂缝。弗吉尼亚州的研究人员还发现: 土工织物的防反效果与接缝的传荷能力有很大关系。在错台量较大的接缝上罩面时, 反射裂缝将很快出现: 较小的位移差可以延缓反射裂缝的出现, 但随着车辆轴重和行车速度的增加, 裂缝将迅速产生。

亚利桑那州的洲际公路 40 号线 (缩缝无传力杆混凝土板), 采用了 13mm 特殊升级配沥青混合料 + SAMI + 13mm 特殊升级配沥青混合料, 四年后, 约有 20% 的横向裂缝发生了反射裂缝 (裂缝宽 1.6mm 左右), 纵缝及原板裂缝处没有发生裂缝, 使用性能良好。

1990 年, 德国不来梅港市的试验观测结果表明: 在接缝的竖向位移小于 0.1mm 的沥青混凝土路面上加铺 SAMI + 薄沥青面层是可行的。

北卡罗来那州试验路的结果表明, 土工织物防治反射裂缝的效果与地理位置有很大关系, 在六条试验路上采用相同的土工织物, 其中四条没有多少效果。

1995 年 5 月, 美国联邦公路管理局专门出版了土工织物设计和施工指南, 英国认为只要精心选择合适的土工织物并采用合理的施工方法, 对旧有路面加铺处理时, 控制反射裂缝的效果还是令人满意的, 而且设置得当的土工织物可以起到防水层的作用。德国的研究认为: 采用合适的土工织物和土工网格、高效的结合料以及工艺细致的铺设方法, 加筋路面基本保证了裂缝的延缓出现并可防止反射裂缝集中出现。前苏联认为采用土工织物夹层可以防止反射裂缝并能减薄加铺层的厚度, 若施工不当产生褶皱或粘层油用量不足会造成加铺层剥落或其它损坏现象。

早在 1937 年, 美国 Michigan 州就使用焊接金属网丝加筋沥青罩面层, 较好的防治了反射裂缝。California 在 US-40 号线使用时 (路面建成使用 20 年后损坏严重的路面板) 采用了钢筋网补强, 在接缝及裂缝处的 60cm 及 120cm 宽度范围内设置钢丝网, 而在整个板面铺设焊接金属网, 然后在上面铺设 7.5cm 的沥青混凝土以及 2.5cm 的升级配沥青混凝土, 使用两年后, 未补强部位多处发生了反射裂缝, 但经补强部位均未发生。Florida 的试验路表明, 在一半深度处设置加筋的沥青混凝土面层, 在减少裂缝方面只有部分地段成功。在澳大利亚的试验中使用效果并不明显。英国在 1951 年最早使用了钢丝网, 后来用加筋土工网格, 在 A30 号公路上的试验指出: 当沥青面层很薄时, 加筋土工网格只能延缓反射裂缝出现的时间, 在使用后期基本没有效果。

上海市政管理处、同济大学在旧水泥混凝土路面上设置特种金属网格作为防反措施的实体工程试验路得出结论: 特种金属网格能将产生裂缝的临界弯沉值由纯沥青混凝土罩面的 0.24mm 增加到 0.30mm; 当旧有水泥混凝土路面接缝两侧的弯沉差 $\Delta L < 0.06\text{mm}$ 时, 反射裂缝的扩张速度缓慢, 当接缝两侧的弯沉差 $\Delta L > 0.06\text{mm}$ 时, 反射裂缝的扩张速度相对加快。因

此,当进行沥青罩面前有必要对水泥混凝土板的脱空进行处理。这也从另一方面说明了脱空水泥混凝土路面研究的重要性。

上海市公路处、同济大学在亭大一级公路实体工程试验路上(掺粉煤灰水泥混凝土上加铺4cm和6cm的沥青混凝土罩面),对土工布的不同铺筑方案进行了对比试验,经两冬两夏的考验,在第六次跟踪观测时,累计标准轴载为83万轴次,满铺土工布路段的完好率为100%,缝铺土工布路段为90%,未铺土工布路段未90%。研究表明:在保证施工质量的前提下,土工布防反效果显著。

上海市浦东市政工程建设处、同济大学在沪闵路高架地面道路(对旧水泥混凝土路和新建水泥混凝土路面)采用不同型号的土工布和玻璃纤维网格在原有接缝处跨缝对称铺设,土工布跨缝两侧各50cm,玻璃纤维网格宽1.5m。经过一冬的考验,标准轴载达88万次后观测得到:土工布+玻璃纤维网加筋段完好率为97%,土工布路段为98%,对比原有路段可见,织物加筋的沥青面层明显好于无加筋面层。

佛山市公路局在莲龙线勒流段采用3cm细粒式沥青混凝土罩面,T010/140型土工布,经过半年的使用观察,铺土工布段反射裂缝出现的条数明显减少。

泉州市公路局在省道205线安酒线全谷镇段,在旧有水泥混凝土路面的纵横缝及损害路段粘贴T010/140型土工布后铺设4cmAC161中粒式沥青混凝土罩面,经半年使用,各项指标满意。平均造价为53元/m²,约为快速修补法造价的1/3。

陕西省交通厅和西安公路研究所在咸阳—乾县一级公路上铺设试验段,经一年考验,认为在路面顶面设置土工网格能够改变沥青层内应力状态,可大幅减少反射裂缝的产生。土工网格设置在沥青上面层夏,可减少高温车辙变小,应用这种加筋结构可提高路面的使用品质、延长使用寿命。

原205国道南京段试验路,对原水泥混凝土路面未作处理,在老路上先涂一层乳化沥青,然后加铺3cm沥青混合料(掺入3%丁苯胶)。使用不久,路面上出现明显的纵、横、斜向反射裂缝。

宁通路南京段试验路,在旧水泥混凝土板接缝处分别铺改性沥青油毡及特雷维拉土工布(原路面仅作灌缝处理),面层为4cm改性的中粒式沥青混凝土,通车3个月后,行车道部分,原路面横缝上方出现明显的反射裂缝。

广佛高速在改造时采用面层加筋,先加铺3cm沥青混凝土然后满幅铺设玻纤格栅再加铺9cm改性沥青混凝土面层,目前使用状况良好。

综上所述,国内外的道路工作者对各种防治反射裂缝的措施均进行了尝试,但由于地理条件、施工工艺、交通量等各方面因素的影响,每种措施都是仁者见仁、智者见智,毁誉掺半,既有成功的例子,也有失败的教训,对于有效的防反措施仍在不断的深入研究中。

3、应力吸收复合夹层 (ISAC)

对于反射裂缝的防治,伊利诺斯洲大学的Mukhtar和Dempsey总结了所进行的减少或延缓AC罩面反射裂缝方法,这些方法包括增加AC罩面厚度、改善沥青性能、在罩面之前铺设抗裂夹层(土工织物)和应力吸收薄膜夹层(SAMI)。认为这些技术没有一个能够完全根除反射裂缝的问题。一些处治方法在某些条件下显示了较好的结果,但大部分在实际工程应用中显示出较差的性能。

通过深入研究引起反射裂缝的原因以及夹层防治反射裂缝的性能,认为SAMI和土工织物都不能完全控制裂缝的产生。SAMI和低劲度的土工织物作为应力削减夹层只能部分减少下面层运动所引起的AC罩面的应力。如使用高劲度的应力夹层,为AC罩面提高强度延缓裂缝的产生,则不允许AC罩面和下部结构层有任何相对运动,这将对层间的粘结和应力吸收夹层的高劲度提出很高的要求。如果由高劲度土工织物和应力吸收薄膜复合组成夹层,裂缝运动能够被有效控制。这样材料一同作用来减轻裂缝顶部的应力同时为罩面提供强度,这一

复合层可以控制裂缝向上延伸，消散接缝/裂缝顶部的应力。基于反射裂缝的机理和观测到的 AC 罩面的性能，ISAC 系统被用来有效阻止 AC 罩面中裂缝向上的延伸，同时提供足够的强度^[5]。所有的 ISAC 材料和性能特性通过复杂的理论研究和试验评价方法来选定。

ISAC 系统包括低劲度的土工织物、粘弹性膜 (SAMI)、和高劲度土工织物。见图 1-5：

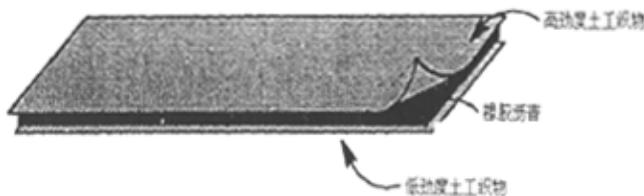


图 1-5 ISAC 复合夹层结构示意图

低劲度的土工织物放在复合夹层的底部，这一层有如下三个功能：

- 1) 保护粘弹性膜；
- 2) 在粘层的帮助下与原有路面充分粘结；
- 3) 由于低刚度，在接/裂缝处能容纳足够大的应变以允许下面层的水平运动而不破坏与板的粘结。

很多的粘弹性材料可以在 ISAC 中用作膜层，如 5-7mm 厚的橡胶沥青层。这个“三明治”粘弹性膜层起如下三方面的功能：

- 1) 在两土工织物之间提供柔性粘结；
- 2) 作为应力吸收夹层 (SAMI) 并允许在土工织物的顶部和底部以及罩面和下面层之间有相对水平运动；
- 3) 防止水进入基层引起 AC 罩面的裂缝发展。

高劲度的土工织物形成 ISAC 的上层。这一土工织物需要劲度大于 700KN/m，这一层具有如下功能：

- 1) 保护粘弹性膜；
- 2) 与罩面充分粘结；
- 3) 为罩面提供高劲度和强度，其较小的变形率可以减轻加铺层的应力集中；

在摊铺 ISAC 之前要对原有路面加铺粘层，同样也可以在 AC 罩面和 ISAC 之间加粘层。ISAC 系统的上层作为硬层相当于加筋作用，中间的粘结层起防水作用，下面的软层作应力消减层。

ISAC 复合夹层在美国伊利诺斯州得到应用，其作为防反射裂缝的新理论在 TRB2001 会议的最终报告中得到强调。而国内对复合夹层的研究较少，无论是室内材料试验还是实际应用都非常少，基于复合夹层作用机理，其具有一定的应用研究价值。

应用实例：

美国伊利诺斯州在多条旧水泥混凝土路面加铺改造过程中使用了复合夹层，IL38 Rochelle 于 1994 年夏修建，其沥青面层厚 6cm，于 2000 年 7 月 14 日调查时，其平均横向接缝间距为 7.6m。

US 67 Jacksonville, IL 于 1998 年修建，2001 年 4 月 20 最后一次调查时两公里的 6cm 沥青加铺层共出现 3 条裂缝。

§1.2.3 旧水泥混凝土补强后加铺沥青混凝土罩面

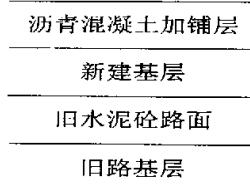


图 1-6 “白+补强层+黑”罩面结构示意图

有时为了减轻旧板裂缝以及错台引起的应力集中对沥青加铺层的直接作用,通常在旧水泥混凝土路面上设置一半刚性基层或级配碎石基层以达到补强或隔离作用,从而提高沥青混凝土加铺层的使用寿命。

在旧水泥混凝土路面上加铺一半刚性基层(水泥稳定碎石基层或二灰碎石基层^[7])进行补强然后再加铺沥青面层,在国内的早期改造工程中应用较多,但是由于半刚性基层本身的温缩和干缩特性,使得半刚性基层本身容易出现早期开裂^[8],影响沥青面层的使用寿命,在如今的加铺改造工程中此类方案应用较少,有些地区逐渐采用加铺 20cm 水泥稳定碎石或二灰碎石补强然后加铺 24cm 以上的水泥混凝土板这类方案。

级配碎石作为半刚性基层与沥青面层之间的中间层国内尚不多见,但在澳大利亚和南非作为减缓沥青路面反射裂缝的一种措施应用较多,且较为成功。

级配碎石具有良好力学非线性,但是国内的实例加铺工程也不尽成功,这主要归结到级配碎石加铺层的两大关键控制因素:优质级配碎石以及一流的施工工艺是级配碎石层成败的关键。

工程实例:

104 国道浙江绍兴段试验路,1994 年在旧水泥混凝土板(修于 1972 年,厚 20cm)上铺设塑料,再铺沥青碎石,通车不久后,即出现大量坑洞^[9]。

浙江省 104 国道于 1997 年进行旧路加铺改造工程,采用方案:在旧路上加铺 20cm 级配碎石+6cm 沥青贯入式+5cmAM-25+3cmAC-13II,至今使用状况良好。

十苏王线 83K+372~86K+830 段,旧路修于 1988 年,22cm 水泥混凝土路面,出现病害已 6 年。1996 年 9 月改造,先对松动板块进行处理,然后加铺 15~18cm 二灰碎石及 6+4cm 沥青混凝土路面,至 1997 年 9 月未发现明显纵横裂缝,无推挤等病害,运行情况良好。

宁淮一级公路 1998 年采用 20cm 二灰碎石作基层然后加铺 7cm 普通沥青混凝土罩面,至今使用状况良好。

104 国道曲阜北段(K582+052~K603+452),原设计路面结构为:面层为 22cm 厚水泥混凝土板,基层为 18cm 厚石灰土,1987 年通车,1994 年开始补强,补强措施为:加铺 15cm 的水泥稳定碎石与 6cm 沥青混凝土,通车一段时间使用状况良好。

广西南宁至梧州二级路也采用了级配碎石加铺方案,通车一段时间后出现较严重损坏,调查后认为,级配碎石含泥量过大和碾压不足是主要的原因。

§1.2.4 碎石化后加铺面层

碎石化(Rubblization)是指针对旧水泥混凝土路面大面积破坏已丧失了整体承载能力,并且通过局部的挖除、压浆等处治方式已不能恢复其使用功能,并且通过加铺方式存在反射裂缝问题或已不能达到结构强度要求的情况下对旧水泥混凝土板块采用的一种终极处理方法。一般是利用特殊的施工机械,对局部基层破坏严重的部位进行处治后,将水泥混凝土板块破碎成较小的粒径(<30cm,甚至更小)进行碾压,并加铺新的路面结构,通常可以加铺

水泥路面或沥青路面，使用较多的是加铺沥青混凝土罩面^[10]。

当原有水泥混凝土路面的功能性破坏以及结构性破坏均非常严重时，进行路面修复所需的投资、周期均非常大时，可以对原有路面采用碎石化技术，以便彻底消除反射裂缝，并将碎石化后的粒料层作为新建路面的基层，通常用乳化沥青处治。通常来说，水泥路面在一些大型的破碎机械作用下可以达到以下目的：

- 1) 破碎后，原水泥混凝土路面病害可以消除；
- 2) 原水泥混凝土路面破碎后具有一定的强度；
- 3) 使原水泥混凝土板块破碎后在平面上强度分布均匀；
- 4) 破碎后，不会产生应力集中，影响加铺沥青混凝土层。

通过碎石化工艺，旧水泥混凝土板块破碎成粒径小于30cm的颗粒，该层的弹性模量有很大程度的降低，相应地，其承载能力也会降低很多，所以碎石化应在旧水泥混凝土板块已不能通过其它方式修复的情况下采用，才是经济上合理的。旧水泥混凝土路面最难以处理的问题是板底基层的损坏和板底脱空形成的相邻板块间的沉降差，这两个问题也是造成其它非碎石化工艺处治后加铺沥青面层使用寿命较短的直接原因。通过碎石化达到的基本目的是消除以上情况，形成一个强度上均匀的平面，在此基础上加铺可保证新路面结构的可靠性。

实际工程中，基层损坏、板底脱空、差异沉降、板块断裂这些问题又是联系在一起的。碎石化过程就是消除这些问题的过程，要解决基层损坏问题，单纯依靠碎石化工艺是不够的，需要根据具体情况，分清损害原因，并对局部损坏严重位置进行特殊处理。

碎石化技术在我国还处于应用初期，只有山东等少数省份采用，通常是直接加铺沥青面层，其性能有点类似沥青稳定基层沥青路面。

根据国外的工程实践，碎石化方法用来消除反射裂缝是比较成功的。不过，因为碎石化使原结构的整体强度降低，再加铺后也存在一些问题，比较严重的是车辙问题。

工程实例：

美国第35号州际公路南向车道上曾经进行了22.8cm厚的JRCP（钢筋混凝土路面）碎石化后加铺沥青上面层的工程实践。分别加铺了10cm和20cm面层，加铺六年后路面都出现了明显的车辙破坏和纵向疲劳开裂。虽然20cm加铺层的情况要好于10cm加铺层，但仍无法避免其破坏。这一工程实例显示，碎石化技术对板块进行破碎后，该层结构强度大大降低，在进行碎石化后新路面结构设计时，要充分考虑到这种强度降低，使新结构可以较长时间地承受荷载作用。

特拉华州（Delaware）I-95号州际公路在2000年曾采用碎石化工艺，该路段水泥混凝土板块厚度为10英寸（约25cm），已使用32年，截至1997年的年平均日交通量（AADT）达到了85,000辆，迅速达到其使用寿命，需要进行大修或重建。其重建包括两种处治方法，一是大面积罩面和局部的重建，重建部分采用30cm的破碎水泥混凝土底基层、29cm的SuperPave沥青稳定基层和4cm的SMA磨耗层；其它大部分路面将原水泥混凝土板块破碎后作底基层，加铺26cm的SuperPave沥青稳定基层和4cmSMA抗磨耗罩面。

密苏里州在35号州际公路的哈里森郡段上有一定里程的试验段，包括两段7英寸和两段11英寸的沥青混凝土罩面，其中一段7英寸和一段11英寸的路段设置了纵向边缘的排水设施。所有路段在轮迹范围以外都出现了纵向裂缝，在没有设置排水设施的路段出现了一些轮迹处的纵向疲劳裂缝。八年后的使用状况如此还是可以接受的。

水泥混凝土路面也可作为碎石化后加铺层。宾夕法尼亚州已在重载交通量较大的80号州际公路上大量采用，结果令人满意，这种实践将继续下去。当然，碎化的主要目的是消除沥青混凝土加铺层反射裂缝，在碎石化层上加铺水泥混凝土层后的这种作用不是很明显。

323国道广东省南雄市附城至始兴县交界段修复工程。原水泥砼路面建成于1994年，部分路段是在原沥青路面上铺筑。经过多年使用，混凝土路面出现破碎、断裂、沉陷、脱空

等严重病害,混凝土路面平均断板率达到39% (最大51%,最小23%),路面状况处于极差状态。旧路面采用型号为IMPACTOR2000单轮式四边形冲击压实机平均冲压8遍,再撒布约1cm厚的石屑填缝振压,并开放交通碾压;底基层采用15cm厚4%水泥稳定碎石,设计弯沉值118(0.01mm);基层采用15cm厚5%水泥稳定碎石,设计弯沉值63(0.01mm);下面层为5cm中粒式沥青混凝土,上面层采用4cm细粒式沥青混凝土。该工程于2002年9月开工,同年12月完成下面层的施工,于2003年6月完成沥青混凝土上面层的施工。自通车以来,路面在部分路段,主要是高填方路段,出现纵向、横向裂缝。

104国道湖州段位于浙江北部水网地区,原路面结构为45cm二灰碎石加22cm水泥板,破板率27.3%,采用镐式破碎机破碎成不大于30cm的小块,确保压实度达到95%以上,然后在其上加铺25二灰碎石基层在加铺4cmSBSAC16-I+6cmAC25I,通车一段时间使用状况良好。

205国道(新线)天长段,即宁连公路安徽省天长段改造工程。原路面结构为水泥混凝土路面,设计荷载汽一超20,验算荷载挂一120。旧路面采用SP—10型五边型压实机冲压破碎,作为新建路面结构底基层,然后加铺水泥稳定碎石基层和水泥混凝土面层结构。通车半年后的路面状况优良。

312国道安徽合宁路分别于2002年的7月和2003年的6月做了两段大约两公里的试验路,破碎后采用乳化沥青处治,直接加铺18cm的沥青面层,通车至今使用效果良好。

另外,我国山东、安徽等省引进国外的MHB碎石化机械破碎旧水泥混凝土路面板,然后用乳化沥青稳定粒料底基层,再加铺12cm以上的沥青混凝土面层,通车一段时间后,使用状况良好。

§1.2.5 加铺方案比较

通过国内外旧水泥混凝土路面加铺层使用状况的调研,总结各加铺层的优劣,总的来说,由于板下脱空等病害的处理不尽完善,直接加铺沥青混凝土面层通常使用寿命较短,逐渐趋向于采用补强层后再加铺面层^[14],另外,将旧水泥混凝土板破碎作为粒料底基层再加铺面层在我国也逐渐推广起来,各加铺层方案评价见表1-1

表1-1 旧水泥混凝土路面加铺层方案比较

项目	加铺类型	优点	缺点
1	“白+白”	<ul style="list-style-type: none"> ● 特定地区水泥资源丰富 ● 结构强度高 ● 使用周期长 ● 基层抗冲刷性能好 	<ul style="list-style-type: none"> ● 养护、修复周期长 ● 接缝处的裂缝反射 ● 换板造成环境污染 ● 板下病害的不可预知
2	“白+半刚性基层补强+黑”	<ul style="list-style-type: none"> ● 补强层提高结构强度 ● 减小加铺层应力集中 ● 改善行车性能 ● 路面总厚度较大,改善路面排水性能 	<ul style="list-style-type: none"> ● 造价相对较高 ● 影响路线净空 ● 旧路面的接缝反射 ● 基层材料本身的温缩、干缩现象严重
3	“白+级配碎石+黑”	<ul style="list-style-type: none"> ● 松散粒料不传递拉应力, ● 消散面层应力集中 	<ul style="list-style-type: none"> ● 路面结构整体强度减弱 ● 需关注沥青砼面层的疲

		<ul style="list-style-type: none"> ● 消除了裂缝处的反射裂缝 ● 改善板底水文条件 	<ul style="list-style-type: none"> ● 劳问题 ● 影响路线净空 ● 需要优质级配碎石 ● 施工工艺要求非常高
4	“白+黑”	<ul style="list-style-type: none"> ● 造价相对较低 ● 修复容易,利于养护 ● 相当于一层功能性罩面 ● 改善行车条件 ● 改善板底水文条件 	<ul style="list-style-type: none"> ● 反射裂缝严重 ● 对板的均匀承载能力要求高 ● 通常采用的夹层措施对反射裂缝的防止和控制作用有限
5	“碎石化+面层”	<ul style="list-style-type: none"> ● 修复周期短 ● 彻底消除原有路面的病害, ● 消除局部的应力集中 	<ul style="list-style-type: none"> ● 原有路面强度削弱明显 ● 强度分布不均匀 ● 容易产生车辙 ● 对附近结构物影响较大

§1.3 旧水泥混凝土路面使用状况的评价

§1.3.1 基于 FWD 检测确定旧水泥混凝土板底脱空度研究

水泥混凝土路面板下脱空对板角、板边应力极为不利。水泥混凝土路面的缝边板角处,由于基层的脱空,在荷载作用下,水泥混凝土路面板的工作状态近似于悬臂梁,板角或板边产生过大的弯沉和应力。在重复荷载作用下,最终导致路面板的横面疲劳开裂。因此必须经常性地准确评定板底脱空状态(脱空位置与脱空尺寸),及时地修复。

当面板下产生脱空后,采取灌浆或封底是一种有效的修复措施,但这应当以准确评定脱空状况为基础,否则不但浪费人力、物力,而且可能造成路面的进一步破坏。加拿大的 Wu, S-S 的研究表明^[25],如果封底处理不当将使路面使用性能下降甚至迅速破坏。因此,对使用中的水泥混凝土路面,以可靠的方法评定板下基础脱空的位置及大小,及时采取有效的修复措施,以阻止此类结构性破坏的发展是极为重要的,同时,这也是现代路面管理系统中一个重要组成部分,使脱空评定不但有一定的理论依据,也有良好的实用价值。

经过调研得知张宁等人的研究更符合实际,可用于确定脱空量,现简要介绍其研究结论:

- 1) 通过对水泥混凝土路面缝边荷载~弯沉曲线特征点的分析,建立并验证了接缝传荷工作模型,更精确地描述了接缝的实际工作状态,为接缝传荷能力的准确评定、接缝使用性能的研究以及脱空评定奠定基础。
- 2) 通过对第一传荷状态临界荷载及其对应弯沉影响因素分析,表明脱空对弯沉影响显著,因此用落锤式弯沉仪(FWD)对水泥混凝土路面板底脱空进行评定是切实可行的。但其前提是区分传荷变化与脱空对弯沉的影响,显然,以往单一采用弯沉来评定脱空状况是不切合实际的。
- 3) 提出了以第一传荷状态临界荷载及其对应弯沉作为评定指标的脱空评定方法,从而区分了传荷变化与脱空对弯沉的影响,使得脱空评定在单板系统的基础上进行,大大简化了

评定模型。

- 4) 在实际应用中, 可以对典型的地基刚度与板厚参数分别建立脱空尺寸~弯沉回归关系, 其研究结果表明, 它们之间回归效果显著, 这就为以后脱空状况快速评定提供了方便。
 5) 具体结论如下:

文献^[12]建立的板中FWD荷载作用时水泥混凝土路面板下地基刚度的评定模型的验证。可得板边脱空尺寸(y)与弯沉(x)回归关系式:

由图1-7可得板角脱空尺寸(y)与弯沉(x)回归关系式:

$$y = -139322x^2 + 16242.9x - 353.484 \quad (\text{式 1-1})$$

相关系数(correlation coefficient): 0.974005

则可得板角脱空(1/2): $30 \times 30 \text{ cm}^2$

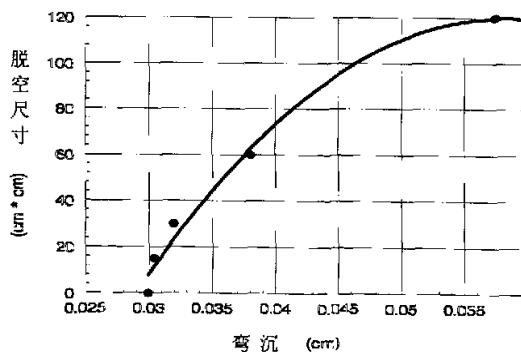


图 1-7 计算板角脱空尺寸与弯沉关系曲线

在张宁的研究中, 其计算得到板角脱空尺寸与弯沉关系曲线, 见图 1-7, 结合相关系数可以看出, 脱空尺寸与弯沉回归效果显著, 脱空对弯沉的影响是显著的。在实际应用中, 可以对典型的地基刚度与板厚参数分别建立上述回归关系式, 对于板边来说:

$y = a_3x^3 - a_2x^2 + a_1x - a_0$: 对于板角来说: $y = a_2x^2 + a_1x - a_0$ 。这样, 只需用 FWD 实测缝边板中和板角弯沉, 即可迅速评定出板的脱空状况, 即脱空量 L。

综上所述, 本文将主要采用张宁的研究方法来评定脱空量 L, 而此时得到的只是脱空面积, 需要进一步分析脱空高度的影响, 即需要综合研究不同荷载作用下脱空度(脱空面积×脱空高度)对加铺层的影响。

§1.4 广西水泥混凝土路面使用状况调研

§1.4.1 广西水泥混凝土路面发展概况

广西区水泥混凝土路面通车里程如表 1-2 所示。到 2002 年底, 水泥混凝土路面总里程达 4976 公里, 其中: 国道 2367 公里, 省道 984 公里, 县道 924 公里, 乡道 645 公里, 专用道路 56 公里。

表 1-2 广西水泥混凝土路面发展里程

年份	年末总里程 km	高速公路总里程 km	路网公路里程
1990 年及以前	107	0	107
1991	163	0	163
1992	201	0	201
1993	455	0	455
1994	511	0	511
1995	688	0	688
1996	797	0	797
1997	1512	237	1275
1998	2389	440	1949
1999	2863	524	2339
2000	4349	785	3564
2001	4726	822	3904
2002	4976	822	4154

广西水泥混凝土路面主要经历了四个主要发展阶段。第一阶段是 1990 年以前, 由于公路建设资金较少, 水泥紧缺, 等级公路少, 修建水泥混凝土路面对低等级公路造价又较高, 因而水泥混凝土路面数量很少, 当时只有 107 公里且大多分散在交通量较小的县乡过境公路。

第二阶段是 1990 年至 1995 年, 即八. 五期间, 水泥混凝土路面低速平稳发展。到 1995 年底, 公路水泥混凝土路面通车里程达 688km。这期间掀起了全国范围内的水泥混凝土路面技术的设计、施工和养护技术的研究高潮。广西紧跟全国水泥混凝土路面技术的发展, 参与了国家及行业攻关研究, 使水泥混凝土路面的发展有了技术保障。

第三阶段是 1996 年至 2000 年, 即九. 五期间, 水泥混凝土路面快速发展。到 2000 年底, 公路水泥混凝土路面通车里程达 4349km。水泥混凝土路面得到快速发展, 一是通过八五科技攻关, 水泥混凝土路面设计、施工和养护技术得到保障; 二是发展等级公路特别是高等级公路, 水泥混凝土路面是路面结构选择之一; 三是资源特点决定了发展水泥混凝土路面具有明显的优势。广西的水泥资源十分充足, 水泥生产能力接近全国水泥生产能力的 1/10, 水泥质量优良, 发展水泥混凝土路面可使用广西当地的水泥资源, 推动经济的发展, 同时减少进口沥青的使用; 四是公路快速发展需要大量的集料, 广西石灰岩地区集料资源适合于发展水泥混凝土路面; 五是广西高速公路水泥混凝土路面的造价较沥青混凝土路面低 30% 左右, 广西建设资金十分紧缺, 修建水泥混凝土路面可节约大量资金, 有利于建设任务的完成。

第四阶段是从 2000 年至今, 新建水泥混凝土路面发展开始减缓。到 2003 年, 广西高速公路水泥混凝土路面里程已突破 1000km。2004 年还将增加 114km。这样, 广西高速公路水泥混凝土路面总里程位居全国第一位。现在, 水泥混凝土路面的发展逐步进入以维护为主的发展阶段, 许多以往修建的路面由于各种原因面临大修。

§1.4.2 广西水泥混凝土路面现状

广西水泥混凝土路面典型结构级配碎石基层厚 15~20cm, 二灰稳定碎石基层厚 18~20cm, 水泥混凝土面板厚 24~26cm。路面结构设计参数为土基模量 $E_0=30\sim36\text{ MPa}$, 级配碎石模量 $E_1=110\sim150\text{ MPa}$, 二灰稳定碎石强度为 $R_{7d}=0.8\sim1.0\text{ MPa}$, 模量 $E_2=500\text{ MPa}$ 。水泥混凝土面层设计弯拉强度为 $f_r=5\text{ MPa}$, $E_c=30000\text{ MPa}$ 。2001 年后建成的公路水泥混凝土路面厚度为 26cm。

广西水泥混凝土路面面层主要采用三辊轴摊铺机施工,早期修建的水泥混凝土路面出现了较严重的断板和错台病害,板底脱空和唧泥现象非常严重,旧水泥混凝土路面面临大修。

表 1-3 广西路网工程使用状况调研表

路段名称	投入使用年份	路面状况指数	断板率 (%)
南宁至梧州二级公路	1993-1998	72.27	20.58
桂林至全州一级公路	1990-2000	65.87	39.24
南宁至百色二级公路	1990-2002	82.02	14.94

全区的水泥路面病害调查表明,水泥混凝土路面的接、裂缝破坏,断板以及错台为主要病害,在调研中发现,唧泥现象非常严重,板底脱空比较严重,每年用于处理断板、脱空和接缝的费用相当高,在这样的情况下,选择适合广西实际的、行之有效的旧水泥混凝土加铺改造方案迫在眉睫,对于合理分配建设资金、保证改造后路面的使用性能有重大意义。

§1.4.3 广西旧水泥混凝土路面改造思路和方案

经过上面的调研得知,对于各种类型加铺层来说,各有优劣。广西作为经济欠发达、水泥资源丰富、水泥混凝土路面通车里程最多的省份,其加铺改造方案的选择必然要考虑充分利用当地的水泥资源。广西的水泥资源十分充足,水泥生产能力接近全国水泥生产能力的1/10,水泥质量优良,发展水泥混凝土路面可有效推动当地经济的发展。在大规模的旧水泥混凝土路面加铺改造过程中,同时考虑到经济因素和广西水泥混凝土路面破坏的特点,选择加铺分离式板补强或在其上再加铺一薄沥青面层以改善行使质量是值得重点考虑,结合2002版《公路水泥混凝土路面设计规范》,为了延长加铺层的使用寿命,要求在分离式加铺层的横向接缝处加入钢筋传力杆(方案一)。同时考虑在旧路面病害较少的路段,为节省建设资金,直接在旧路面上加铺AC罩面同时引入ISAC防治反射裂缝也是可行的(方案二)。在选择优质级配碎石和加强施工质量的前提下,级配碎石夹层也是可以考虑的方案(方案三)。

广西国道322线全州—桂林的一级公路改造工程是广西高等级水泥混凝土路面进行全线加铺改造的第一例,其加铺方案的选择对以后类似的工程具有重要的参考价值,为此广西公路局和东南大学交通学院组成联合课题组对322线的加铺方案的选择和性能进行研究。依托322线的加铺改造工程,根据上文的思路,提出如下三种加铺层方案进行分析,同时在依托工程中铺筑试验路以验证其长期路用性能。所选方案如下:

- 1) 方案一: (水泥混凝土板补强) 旧水泥混凝土路面加铺分离式水泥混凝土罩面并在横向缩缝处设置钢筋传力杆;
- 2) 方案二: (ISAC复合夹层防治反射裂缝) 旧水泥混凝土路面加铺沥青混凝土面层,中间采用ISAC复合夹层防治反射裂缝;
- 3) 方案三: (级配碎石防治反射裂缝) 旧水泥混凝土路面加铺级配碎石后加铺沥青混凝土罩面。

§1.5 本文主要研究内容

上文结合广西的实际提出了三种有代表性的加铺方案,对各种加铺方案的研究(包括力学分析、施工工艺研究等)即为本文的主要内容。

本文着重对以下几个方面进行研究:

- 1) 水泥混凝土路面在使用末期,接裂缝破坏和错台非常严重,而以往的加铺层研究假

定板下基层均匀连续,有必要引入脱空模型来进行旧水泥混凝土路面的加铺层设计,从而更好的符合实际。脱空对加铺层的影响非常大,通过实体工程检测获得脱空区的形态分布特征,引入脱空度概念,采用三维有限元实体模型定量分析脱空度与旧路面板疲劳寿命的关系,分析加铺层破坏的深层次原因。

- 2) 钢筋传力杆的加入可以提高路面板的整体性,减小脱空板底的拉应力,采用有限元模型定量分析钢筋传力杆对脱空水泥混凝土路面板疲劳寿命的影响。
- 3) 在张宁等人对脱空判别研究的基础上,结合 FWD 等无损检测技术对路面参数的获取,进行脱空水泥混凝土路面加铺新水泥混凝土面层设计方法和设计指标的研究,提出路面结构厚度的设计方法。
- 4) 对于旧水泥混凝土路面加铺 ISAC 复合夹层后再加铺沥青混凝土罩面这种结构,基于防治反射裂缝新理论的研究,提出 ISAC 复合夹层材料作为加筋防水材料防治反射裂缝的新理论和新方法,并基于断裂力学-有限元理论分析其作用机理。
- 5) 对于级配碎石加铺方案,引入模型进行旧水泥混凝土路面加铺级配碎石后再加铺沥青混凝土罩面这种结构的力学分析,研究加铺层底的疲劳应力以及级配碎石层的剪应力。
- 6) 试验路施工工艺(包括旧板压浆、ISAC 复合夹层施工)的总结和研究,结合广西全桂路 322 线改造工程,观测总结压浆对于板底脱空处治的效果。

第2章 基于脱空度评价旧水泥砼路面分离式加铺层设计

以往对于水泥混凝土路面的应力分析往往是假定路面基层各向同性、均匀，但当水泥混凝土路面板下出现脱空后，这样的假设与实际严重不符，板底脱空造成面板不均匀支撑，将引起严重的应力集中，极大地降低水泥混凝土板的使用寿命。

结合广西壮族自治区国道322线全州—桂林段大修工程，对多处水泥混凝土路面板下脱空形态进行了现场试验研究，获得脱空区的形态分布特征，联系实际提出脱空度概念（脱空面积×脱空高度），并据此利用大型商业有限元软件ABAQUS对车辆荷载作用下脱空板体内应力变化进行了有限元求解和使用寿命计算。由于接缝是混凝土路面的最薄弱处，为了改善混凝土路面的行使质量，保证混凝土路面的使用寿命，2002版规范规定在承受重交通的混凝土路面横向缩缝必须设置传力杆，利用有限元软件ABAQUS定量分析钢筋传力杆对脱空水泥混凝土路面使用寿命的影响。定量地评价板下脱空、车辆荷载共同作用对水泥混凝土路面板使用寿命的影响。

旧路面板下的基层顶面当量回弹模量是加铺层设计的重要参数之一，结合FWD等无损检测技术对路面参数的获取，利用ABAQUS大型有限元软件，采用20节点等参实体三维单元，评价脱空水泥混凝土路面分离式加铺层的设计，建立一套路面检测评价和加铺层设计系统。

§2.1 脱空水泥混凝土路面使用寿命分析

§2.1.1 水泥混凝土板下脱空区平面分布特征研究

根据广西全州—桂林一级水泥混凝土路面大修改造工程的实际验证，结合落锤式弯沉仪（FWD）先判别出脱空水泥混凝土板，根据现场移除脱空区水泥混凝土板后，发现脱空区多分布在正常行驶车道右侧靠近路肩的板角下，并利用长臂贝克曼梁式弯沉仪对脱空板上分布测点测量其对应的弯沉。

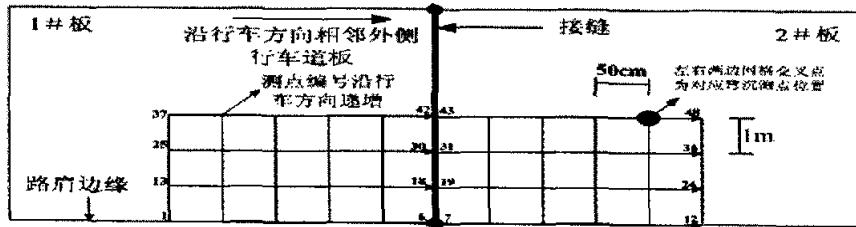


表 2-1 相邻脱空水泥混凝土板号板实测弯沉数据 (单位: 0.01mm)

测点	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
弯沉	47	35	25	44	69	87	92	79	57	23	35	65
测点	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
弯沉	27	19	11	11	32	62	67	51	34	15	27	42
测点	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
弯沉	13	11	9	10	12	15	19	17	9	7	11	19
测点	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
弯沉	5	5	6	6	6	7	6	6	6	5	5	4

根据 FWD 现场判别出的脱空板, 进一步验证脱空板平面弯沉检测分布形态的可靠性, 制定了脱空板钻孔分布图, 进行现场钻芯取样, 通过测量其厚度来计算对应脱空高度, 方法如下:

- 1) 通过自制的直尺, 伸进脱空板的钻芯取样的圆柱形洞中, 测得其距离板表面的高度 L_1 ;
- 2) 测得钻取的芯样厚度 L_2 ;
- 3) 计算得到脱空的高度 $L=L_1-L_2$ 。

另外, 在改造工程中移除脱空旧板进行观测, 可以发现有明显的水泥浆脱空区域的存在。可以进一步验证所测得的脱空高度。

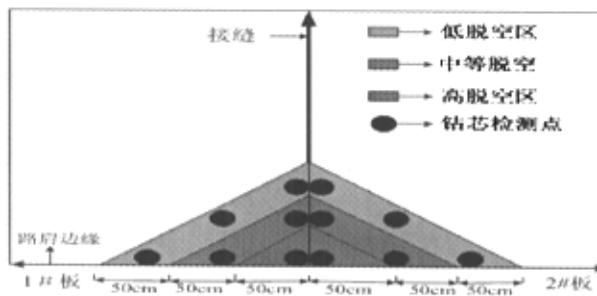


图 2-2 脱空板钻孔分布图

由于整个全桂路的基层类型不尽相同, 所承受的交通轴载也不统一, 另外脱空程度也与道路使用时间有关, 由全桂路的实测脱空数据整理后分成高、中、低三个等级, 具体的数值见表 2-2。

表 2-2 钻孔实测脱空高度数据表 (单位: cm)

不同程度脱空区域	高脱空区	中等脱空区	低脱空区
脱空高度 (cm)	0.4~0.8	0.1~0.4	0~0.1

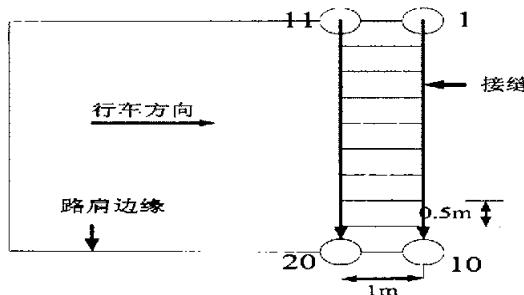


图 2-3 水泥混凝土路面脱空板缝测点平面分布图

表 2-3 脱空板横向接缝边缘弯沉测点弯沉值

测点	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
弯沉	32	34	35	40	38	39	43	48	52	53
测点	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
弯沉	9	11	10	10	9	14	16	17	17	18

由部分实测数据编制的图表分析, 可以得出以下结论:

- 1) 水泥混凝土路面板下脱空区沿板横缝近似对称分布, 当存在板角脱空时, 脱空区域分布为近似的三角形楔形体, 距板中愈近脱空高度愈小, 距板边角愈近脱空高度愈大。这一结论, 在加宽路面路肩开挖时, 被显露出的板与基层之间的间隙分布特征所证实; 在本章的力学分析中假定脱空模型主要为等边直角三角形板角脱空;
- 2) 同样, 当存在板缝脱空时, 距离横缝边缘越近, 脱空高度越高, 距离板中愈近脱空高度愈小。另外, 实测全线大量相邻脱空板外缘板角部位的传荷系数接近零;
- 3) 脱空高度与基层类型、交通量和轴载等因素有关, 实测全桂路的水泥混凝土板底的脱空高度通常介于 0~5mm 之间。

§2.1.2 脱空水泥混凝土板体有限元力学分析

1、脱空度概念的引入

以往的旧水泥混凝土路面的力学分析大多建立在各层连续、同向、均匀的基础上。众所周知, 脱空状况的存在极大的引起旧水泥混凝土板的应力集中, 明显缩短旧水泥混凝土路面的疲劳寿命。联系上节实践中所遇到的旧水泥混凝土板底脱空区域分布特征, 引入脱空度进行旧水泥混凝土路面应力分析以及加铺层设计。

$$\text{脱空度} = \text{脱空面积} \times \text{脱空高度} \quad (\text{式 2-1})$$

2、力学计算模型的假定

为了从理论和力学上分析旧水泥混凝土脱空板的应力, 采用大型有限元程序 ABAQUS, 采用 20 节点等参三维实体单元, 在一定的假设基础上进行理论力学分析。为了更好的符合实际, 在分析时采用如下基本假定:

- 1) 各结构层假设为线弹性体, 对应板角的位置为脱空区, 为了计算的方便, 假定板角脱空高度均相同。板角脱空为等边直角三角柱体, 如图 2-4 所示。
- 2) 各层间竖向、水平位移连续。地基底面各向位移为零, 侧面水平方向位移为零; 旧水泥混凝土面层两端横截面上的水平位移为零。
- 3) 不计路面结构自重的影响, 脱空部分采用在模型中直接挖除相应大小的实体单元来

模拟；

- 4) 路表面作用有温度载荷，路面体内温度传导满足热传导定律，同时认为水平向和最下层无限远处应力与位移为零；
- 5) 温度应力分析时，假定沥青路面整个温度场的计算处于稳态传导，非瞬态传播。假定有限元程序的温度场定义其温度梯度 $T_s=60^{\circ}\text{C}/\text{m}$ ，水泥混凝土的线膨胀系数取 $1 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ ；
- 6) 土基在水平方向和向下的深度方向均为无限，其上路面各层厚度均为有限，但水平方向仍为无限；

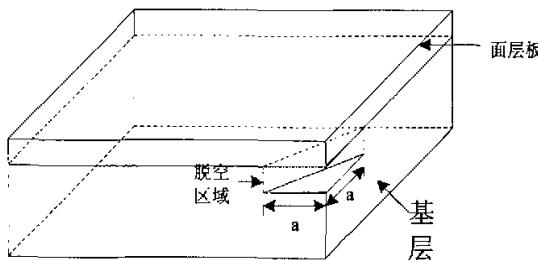


图 2-4 脱空水泥混凝土路面板力学分析脱空模型简化

3、荷载的假定

3.1、荷载的等效简化

以往的力学分析采用圆形均布荷载计算层状体系应力，为了简化有限元计算，根据公路工程技术标准规定的汽车轴距^[14]，保持车轮标准轴距 1.8m 不变，同时不改变两边车轮的轮心距离保持为 3 倍圆形荷载半径长，只改变荷载作用形状。现行的 PCA 法采用有限元法，假定矩形接触面长为 0.8712L，宽为 0.6L，与单圆面积相等^[15]，认为其对刚性路面应力分析产生影响忽略不计。根据作用面积相等原理得到接触轮胎转化后的长度 = 22.75cm，宽度 = 15.65cm。得到车轮横向作用分布图，见图 2-5：

$$\because 0.8712L \times 0.6L = \pi R^2$$

$$\therefore L = 26.11\text{cm}$$

得到转化后的长度 = 22.75cm，宽度 = 15.65cm

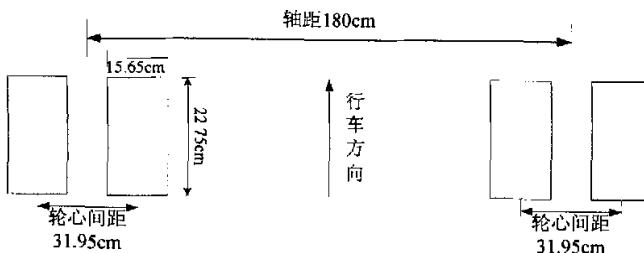


图 2-5 车轮荷载横向分布示意图

3.2、临界荷位的确定

均匀支撑的水泥混凝土路面板在标准车辆轴载的作用下，其板体内产生最大弯拉应力荷位位于板边中处。计算表明，板角脱空的水泥混凝土板极限荷位与其有别，如图 2-6 所示。

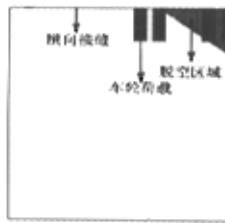


图 2-6 脱空水泥混凝土板临界荷位示意图

3.3、力学分析模型参数

假定力学分析结构:24cm PCC 水泥混凝土板+18cm 基层+15cm 底基层+土基

材料参数:如无特殊说明,模型中的PCC板厚 $h=24\text{cm}$,模量 $E=30000\text{MPa}$,泊松比 $\mu=0.15$;路面基层厚度 $h=18\text{cm}$, $E=1500\text{MPa}$, $\mu=0.25$;底基层厚度 $h=15\text{cm}$, $E=600\text{MPa}$, $\mu=0.25$;土基 $E=50\text{MPa}$, $\mu=0.35$,胎压 $=0.7\text{MPa}$,荷载采用上述简化模型。

3.4、力学计算说明

- 1) 由于计算板角脱空选取的是板角加载,在板角处作用最大荷载,由有限元计算软件ABAQUS得知其最大竖向位移节点为板角处单元节点;
- 2) 因而计算脱空度的影响时,接触点的位置主要为悬臂脱空板板角的竖向最大位移节点,由计算程序直接给出。
- 3) 由于只是判别荷载作用下的接触状况,只要求得最大竖向位移值即可。

4、脱空水泥混凝土路面板的有限元分析

4.1、脱空度对旧水泥混凝土板的应力影响

结合旧水泥混凝土路面大修改造实体工程,当水泥混凝土路面板疲劳断裂时,挖除破碎板,发现通常板底脱空高度范围变化在 $0\sim5\text{mm}$ 。

由于通常板缝完全脱空的情况并不多见,研究表明板缝的完全脱空都是从板角脱空发展起来的,所以本文主要分析板角脱空对水泥混凝土路面的影响。

表 2-4 板角脱空时板角作用荷载应力计算结果表

脱空面积 cm*cm		30× 30	60× 60	90× 90	120× 120	150× 150	180× 180	240× 240
0.2	σ/MPa	1.104	1.121	1.125				
	U_3/mm	0.165	接触	接触				
0.4	σ/MPa	1.106	1.325	1.802	1.808			
	U_3/mm	0.167	0.336	接触	接触			
0.6	σ/MPa	1.107	1.370	1.990	2.002			
	U_3/mm	0.169	0.365	接触	接触			
0.8	σ/MPa	1.108	1.374	1.995	2.361	2.366		
	U_3/mm	0.169	0.393	0.645	接触	接触		
1.0	σ/MPa	1.109	1.378	1.996	2.681	2.817	2.822	
	U_3/mm	0.170	0.393	0.646	0.980	接触	接触	
5.0	σ/MPa	1.110	1.378	1.996	2.688	2.967	3.442	3.978
	U_3/mm	0.171	0.393	0.646	0.981	1.382	1.864	2.481

注: σ 为板中最大应力; U_3 为脱空板角荷载作用下最大竖向弯沉值,接触表示此时板角与基

层接触。

通过上述表格数据可以发现：

- 对于不同脱空高度，当脱空尺寸小于 $60 \times 60\text{cm}$ 时，板角荷载作用下板底应力小于或接近按 2002 版规范公式计算的标准轴载在板纵向边缘中部的最不利荷位产生的最大弯拉应力 1.114MPa ，表明脱空区不大时，对路面板的使用寿命影响不大，原因可能是由于当脱空尺寸小于 $60 \times 60\text{cm}$ 时，车轮荷位距板底脱空区临界截面的距离很小，进而产生较小的弯拉应力。如实践中发现板角断裂边通常为 $80\sim 150\text{cm}$ 。
- 板角脱空，水泥板近似于悬臂梁，当水泥板受力处于非接触状态时，板底脱空高度对板底应力几乎没有影响，在荷载作用下，当板底与基础接触后，随着脱空区域的增大，板底应力几乎没有变化。
- 当板底处于悬臂状态时，脱空区域的增大，板底应力的增加比较明显。对于脱空度这一概念，认为相对于脱空高度来说，脱空面积的大小对板底应力的影响最大。
- 对于同一脱空面积，脱空高度的变化影响着不同轴重车辆作用下板底接触状况，如脱空高度越大，需要更大的轴载才能使板底与基层接触。即脱空高度较大时，在重载车辆作用下板仍处于悬臂状态时，其板底应力集中将非常严重。
- 这也说明了脱空对水泥混凝土路面沥青加铺层这类结构的影响，该种加铺结构仍由旧水泥混凝土路面板来承受荷载，沥青加铺层不提高路面的强度，这也从侧面说明了对于脱空处治较差路段的沥青加铺层很快出现破坏就不足为奇了。
- 通常采用的沥青直接加铺层方案并不能有效降低板本身的破坏，也不能有效消散荷载作用下接缝处脱空区域板的变形而引起的沥青面层的应力集中。

为了进一步说明脱空高度的影响，假定脱空面积取最大值 $180\text{cm} \times 180\text{cm}$ ，分析标准轴载作用下不同厚度板的临界脱空高度。

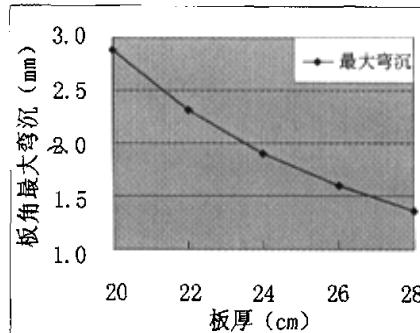


图 2-7 不同板厚的临界脱空高度

通过图 2-7 得知：对于通常设计的水泥混凝土板，在标准轴载作用下，其脱空高度超过 3mm 之后，其基本处于悬臂梁受力状态。

较厚板 ($>24\text{cm}$) 对减小脱空区域竖向最大弯沉有较明显作用。

4.2、脱空水泥混凝土路面应力分析

4.2.1、脱空水泥混凝土路面荷载应力分析

当水泥混凝土板底脱空，雨水进入基层，在车辆荷载的作用下，冲刷基层以形成更大的脱空区，从而加速脱空板的疲劳断裂。2002 版《公路水泥混凝土路面设计规范 JTGD40-2002》规定规定标准轴载在临界荷位处产生的荷载疲劳应力 σ_{pr} 为标准轴载在四边自由板的临界荷位处的荷载应力 σ_{ps} 乘以相应的系数得到，即 $\sigma_{pr} = k_r k_f k_c \sigma_{ps}$ ，令 $K_{\text{总}} = k_r k_f k_c$ 。本节

主要定量分析车辆荷载作用对脱空板的影响。

表 2-5 不同设计标准轴载下荷载疲劳应力计算系数

设计标准轴载累计作用次数 N_e (10^4)	400	800	1200	1600	2000	3000	4000	
荷载疲劳应力系数 K_f	2.379	2.474	2.532	2.574	2.607	2.668	2.712	
接缝传荷能力的应力折减系数 K_r					0.87			
偏载和动载等综合系数 K_c				高速公路取 1.3				
				一级公路取 1.25				
总系数 K_s	高速公路	2.691	2.798	2.864	2.911	2.949	3.018	3.067
	一级公路	2.587	2.690	2.754	2.799	2.835	2.901	2.949

表 2-6 不同轴载作用下脱空水泥混凝土板底弯拉应力 (MPa) 计算表

板厚 (cm)	轴重 (kN)	脱空量 (cm×cm)				
		60×60	90×90	120×120	150×150	180×180
24	100	1.335	1.725	2.074	2.408	2.729
	150	2.003	2.588	3.111	3.612	4.094
	200	2.670	3.450	4.148	4.816	5.458
	250	3.338	4.313	5.185	6.020	6.823
	300	4.005	5.175	6.222	7.224	8.187
26	100	1.128	1.46	1.738	2.008	2.279
	150	1.692	2.190	2.607	3.012	3.419
	200	2.256	2.920	3.476	4.016	4.558
	250	2.820	3.650	4.345	5.020	5.698
	300	3.384	4.380	5.214	6.024	6.837
28	100	0.985	1.341	1.555	1.694	1.801
	150	1.478	2.012	2.333	2.541	2.702
	200	1.970	2.682	3.110	3.388	3.602
	250	2.463	3.353	3.888	4.235	4.503
	300	2.955	4.023	4.665	5.082	5.403

由表 2-6 知道, 随着轴重的增加板底的应力基本也是线性增加的, 随着轴重的成倍增加, 水泥混凝土板的疲劳寿命基本是呈几何次幕下降, 在重载车辆的作用下, 脱空板角很快出现断裂。重载车辆的作用是脱空水泥混凝土板的破坏的主要原因。

同样可以发现, 增加板厚 (2cm) 可以有效降低板底的不利应力, 从而提高路面的使用寿命。即增加板厚是提高脱空水泥混凝土路面使用寿命的有效手段。

4.2.2、脱空水泥混凝土路面温度应力分析

一年四季大气温度周期性的变化以及每一天白昼黑夜气温的变化, 使得混凝土路面的温度也随之产生周期性的变化。由于混凝土材料的不可塑性, 当温度发生变化时伴随着将产生明显的体积变化, 路面将由此产生膨胀收缩等变形, 称为温度变形。一旦路面因温度产生变化所产生的变形受到约束, 不能自由伸缩, 则路面将产生巨大的内应力, 称为温度应力^[16]。温度应力和荷载应力同样都是刚性路面产生破坏的主要因素, 同时也是加铺层底部产生张拉型反射裂缝的主要原因, 在旧水泥混凝土路面加铺层设计中, 必须引起足够的重视。

2002 版规范规定, 温度疲劳应力系数可按下式计算确定:

$$k_i = \frac{f_r}{\sigma_{tm}} \left[a \left(\frac{\sigma_{tm}}{f_r} \right)^c - b \right] \quad (式 2-2)$$

其中: a、b、c 参数取值见表 2-7。

而临界荷位处的温度疲劳应力按下式确定:

$$\sigma_{tr} = k_i \sigma_{tm} \quad (式 2-3)$$

表 2-7 温度应力回归系数表

系数	公路自然区划					
	II	III	IV	V	VI	VII
a	0.828	0.855	0.841	0.871	0.837	0.834
b	0.041	0.041	0.058	0.071	0.038	0.052
c	1.323	1.355	1.323	1.287	1.382	1.270

表 2-8 不同脱空尺寸对脱空板底计算温度应力的影响 (单位: MPa)

板厚 (cm)	脱空尺寸 (cm × cm)				
	60×60	90×90	120×120	150×150	180×180
20	1.84	1.78	1.71	1.67	1.64
22	1.98	1.92	1.84	1.80	1.76
24	2.10	2.04	1.95	1.91	1.87
26	2.19	2.12	2.04	1.99	1.95
28	2.27	2.20	2.11	2.07	2.02

脱空板的温度应力有限元计算表明, 板底脱空的存在对板的温度内应力有一定影响, 随着脱空尺寸的增大, 板底的温度内应力成下降趋势, 这可以理解为由于脱空的存在使得板与地基之间的联结变弱, 对变形的束缚减小, 从而引起的温度翘曲应力有略微减小, 总的来说影响幅度较小。

分离式双层板仅需计算上层板的温度疲劳应力, 因而, 当上面加铺有分离式水泥混凝土加铺层时, 温度应力计算时可以略去板底脱空对加铺层温度应力的影响, 直接采用 2002 版规范规定的分离式加铺层温度应力计算公式。

4.3、脱空水泥混凝土路面疲劳应力分析

《公路水泥混凝土路面设计规范 JTG D40-2002》规定, 水泥混凝土路面面层是以行车荷载疲劳应力和温度疲劳应力综合作用产生断裂作为设计标准, 即行车荷载产生的荷载疲劳应力和温度翘曲应力之和不超过混凝土弯拉强度的设计值。

$$\gamma_r (\sigma_{pr} + \sigma_{tr}) \leq f_r \quad (式 2-4)$$

当表 2-6 中的临界荷位计算应力乘以相应的总系数 K_s (通常 2.5 以上), 24cm 板厚脱空量在 120cm × 120cm 时, 其荷载疲劳应力 σ_{pr} 已超过 5MPa, 如果再加上表 2-8 温度疲劳应力的综合作用, 混凝土达到或超过其极限抗拉强度, 将很快疲劳断裂。

通过对脱空水泥混凝土板荷载应力和温度应力的分析认为, 板下脱空区域的存在将极大的增加板的疲劳应力 (主要是由荷载引起的疲劳应力), 从而明显缩减板的疲劳寿命。

§2.1.3 脱空水泥混凝土板疲劳寿命分析

混凝土疲劳特性的研究，大多采用室内疲劳试验，对混凝土梁试件施加固定变化幅度的反复弯曲应力，测定试件出现断裂破坏时的反复应力作用次数，由此建立不同反反复应力级位与相应的疲劳寿命之间的经验关系。通常，以反反复应力最高值同该试件在一次荷载作用下的极限强度的比值，即应力水平来表示反反复应力级位。试件承受不同应力级位，有不同疲劳寿命，由此可以建立应力级位 S 与疲劳寿命 N 之间的经验关系式。一般采用单对数或双对数关系建立 $(S-N)$ 的疲劳方程，而后，根据疲劳方程按照轴载等效的原则建立轴载换算方法。

对于混凝土的疲劳方程，国内外一些学者和机构进行了研究。Feret 首先进行了混凝土的弯曲疲劳试验，随后，Kesler、McCall、Ballinger、Galloway、Hus Wirsching、永松静等人也对混凝土材料的弯曲疲劳特性进行了研究，得出如下疲劳方程：

$$S = \frac{\sigma_{\max}}{f_r} = \alpha - \beta \lg N \quad (式 2-5)$$

Deter 在汇总了上述等人的梁试件弯曲疲劳试验结果后，整理得出了失效概率为 50% 时的回归系数 $\alpha = 1.0$ ， $\beta = 0.0568$ 。美国波特兰水泥协会(PCA)采用的系数为 $\alpha = 0.972$ ， $\beta = 0.0828$ ，而比利时的 Veverka 等得出的试验结果为 $\alpha = 1.0$ ， $\beta = 0.05$ 。

采用规范的单对数疲劳方程，本节脱空水泥混凝土板使用寿命计算按下式单对数疲劳方程^[15]进行：

$$N_f = 10^{\frac{12.26 - 12.987 \frac{\sigma}{f_m}}{f_m}} \quad (式 2-6)$$

其中： σ = 水泥混凝土路面弯拉应力（未考虑温度应力），MPa；

f_m = 水泥混凝土路面弯拉强度，取 4.5 MPa

N_f = 荷载允许作用次数

假定在标准单轴荷载 BZZ-100kN 作用下，脱空板处于最不利受力状态，即其受力处于悬臂状态，并按疲劳方程换算得到各脱空度下板的疲劳寿命，见表 2-9：

表 2-9 荷载作用下不同厚度脱空板使用寿命计算表

板厚(cm)	脱空尺寸(cm×cm)				
	60×60	90×90	120×120	150×150	180×180
20	3.43×10^6	2.65×10^4	8.49×10^3	987	206
22	1.23×10^7	8.32×10^5	7.24×10^4	3.56×10^3	312
24	4.25×10^7	3.16×10^6	3.18×10^4	4.98×10^3	611
26	6.34×10^8	4.87×10^7	5.12×10^6	8.54×10^5	8.68×10^4
28	1.36×10^9	3.57×10^8	4.73×10^7	2.31×10^7	7.18×10^6

通过对比上述脱空水泥混凝土板的疲劳寿命数据，得到：

- 当脱空程度相同时，板厚由 24cm 降低到 20cm，脱空水泥混凝土路面板使用寿命随脱空程度的增加而急剧减少。
- 当板厚由 24cm 增加到 28cm 时，脱空水泥混凝土路面板使用寿命在不同脱空程度下都有显著增加，脱空程度越大增幅越高。即增加板厚可以明显提高水泥混凝土路面

在脱空状态下的疲劳寿命。

- 3) 鉴于水泥混凝土路面板通常板角断裂边长为 80~150cm, 认为通常的板角脱空面积大致跟板角断裂面积差不多, 应该将水泥混凝土板厚增加至 26~28cm 以上, 才能够较好的满足其使用寿命。

增加水泥混凝土板的厚度可以有效提高水泥混凝土板的疲劳寿命, 根据表 2-6 数据定量研究板厚对脱空水泥混凝土路面使用寿命的影响。

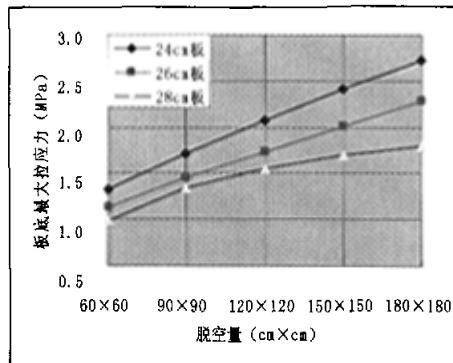


图 2-8 标准轴载作用下不同板厚时不同脱空度的板底应力

通过对比表 2-9 数据可知, 增加板厚可以有效降低板底的不利应力, 同样可以有效抵抗重载车辆的疲劳破坏, 从而提高路面的使用寿命。

由于各种原因, 水泥混凝土路面在通车几年即出现较严重的脱空病害, 近年来水泥混凝土路面厚度已达到 26cm, 从图 2-8 的曲线可以形象的看到, 当板厚在 24cm~26cm 时, 水泥混凝土板底应力随脱空量增加几乎呈直线增长, 当水泥混凝土板达到 28cm 时, 其应力随脱空量的增加趋势明显变缓, 出现缓坡, 形象的说明了增加板厚抵抗脱空引起的破坏是比较明显的。现有的水泥混凝土路面通常在通车几年后就会出现较严重的板底脱空状况, 进而在荷载尤其是重载作用下将非常快的出现板断裂现象, 基于水泥混凝土路面的疲劳寿命分析认为现高等级水泥混凝土路面板厚应达到 26cm~28cm 以上。

§2.2 钢筋传力杆对脱空水泥混凝土路面使用寿命影响分析

钢筋传力杆能有效增加板和板之间的联结刚度, 尤其在板沿接缝处断裂后, 其作用更明显。一方面其可以减小接缝处的竖向位移, 研究表明接缝处非常小的位移都会对加铺层产生较大的应力集中; 另一方面, 钢筋传力杆的加入可以较好的减轻水泥混凝土板底的应力, 尤其是脱空水泥混凝土板的应力, 从而可以有效的提高脱空水泥混凝土路面板的使用寿命。

本节利用 ABAQUS 有限元软件, 定量分析缩缝处钢筋传力杆在水泥混凝土路面中的作用。

§2.2.1 钢筋单元分析模型的确定

1、分离式模型

分离式模型把混凝土和钢筋作为不同的单元来处理。即钢筋和混凝土各自被划分为足够小的单元。在平面问题中, 混凝土可划分为三角形或四边形单元, 钢筋同样也可以划分为三角形或四边形单元。由于钢筋是细长结构, 通常就可以忽略钢筋的抗剪作用, 这样可以将钢筋作为线性单元来处理。这可以大大减少单元数目, 并且可避免因为钢筋单元划分过细而在

钢筋和混凝土交界处采用大量过渡单元^[17]。

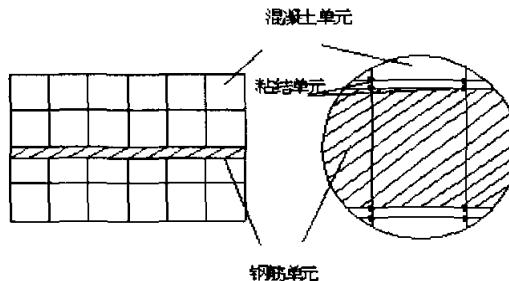


图 2-9 分离式钢筋单元模型

在分离式模型中，钢筋和混凝土之间可以插入联接单元来模拟钢筋和混凝土之间的粘结和滑移，见图 2-9，这是后面讲的组合式和整体式钢筋有限元模型无法实现的。如果钢筋和混凝土之间粘结很好，不会有相对滑移，这时候钢筋和混凝土之间的联接就是刚性联接，就不需要联接单元了^[18]。

能够模拟钢筋和混凝土之间的粘结和滑移是分离式模型在模拟钢筋作用时的一大优势，但是由于钢筋相对于混凝土来说尺寸很小，所以这使得在使用分离式模型进行单元划分时就有一定的难度

分离式单元的刚度矩阵，除了联接单元外，与一般的线性、平面和立体单元没有什么区别。

2、组合式单元

当钢筋和混凝土之间的粘结较好时，可以认为两者之间无滑移时，可以采用组合式或整体式模型。如第一章里叙述的那样，相对于钢筋直径比较小，分步比较均匀的构件，它们所受到的粘结应力就比较小，这样钢筋和混凝土之间的滑移就可以忽略不计。这时候就可以用组合式模型来对钢筋进行有限元模拟。以下是一些常用的组合式单元的介绍。

2.1、分层组合式^{[19][20]}

在组合式模型中，最常用的有两种方式。第一种是分层组合式，即在横截面上分成许多混凝土层和若干钢筋层，并对截面的应变做出某些假定（例如，应变沿截面高度为直线分布是应用最广泛的假设），根据材料的实际应力应变关系和平衡条件可以导出单元的刚度表达式（轴向刚度和弯曲刚度）。这种组合方式在杆件系统，尤其是在钢筋混凝土板，壳结构中应用很广。

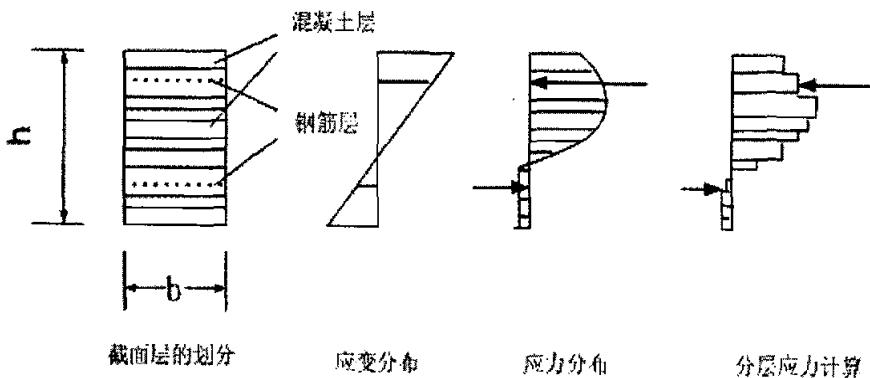


图 2-10 组合型钢筋单元

这种方法将混凝土分成许多个条带（如图 2-10 所示），而将同一层钢筋分成同一钢筋条带内。对一般受弯构件来说，将混凝土分为 7 到 10 层就能满足工程要求。同时，在计算中假定每一个条带上的应力是均匀分布的。

2.2、带钢筋的四边形单元

设有任意四边形单元重包含有一根钢筋，单元结点位移和单元结点位移分别为：

$$\{F_e\} = [X_1 \ Y_1 \ X_2 \ Y_2 \ X_3 \ Y_3 \ X_4 \ Y_4]^T \quad (式 2-7)$$

$$\{\delta_e\} = [u_1 \ v_1 \ u_2 \ v_2 \ u_3 \ v_3 \ u_4 \ v_4]^T \quad (式 2-8)$$

无钢筋时单元刚度矩阵可按下列计算： $[K_e] = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 [B]^T [D] [B] J |td\xi d\eta|$ 这是一个 8×8 的矩阵，它将 $\{F_e\}$ 和 $\{\delta_e\}$ 联系起来，即有 $\{F_e\} = [K_e] \{\delta_e\}$ 。对于单根钢筋，其单元刚度矩阵可按下式计算：

$$[\bar{K}_e] = \frac{EA}{l} \begin{bmatrix} c^2 & cs & -c^2 & -cs \\ cs & s^2 & -cs & -s^2 \\ -c^2 & -cs & c^2 & cs \\ -cs & -s^2 & cs & s^2 \end{bmatrix} \quad (式 2-9)$$

它联系了钢筋结点力 $\{\bar{F}_s\} = [X_a \ Y_a \ X_b \ Y_b]^T$ 和结点位移 $\{\bar{\delta}_s\} = [u_a \ v_a \ u_b \ v_b]^T$ 即有 $\{\bar{F}_s\} = [\bar{K}_s] \{\bar{\delta}_s\}$ 。若要计算 $[\bar{K}_s]$ 如何贡献到整个单元中去，为此则要推导出 $\{\bar{\delta}_s\}$ 和 $\{\delta_e\}$ 的关系。

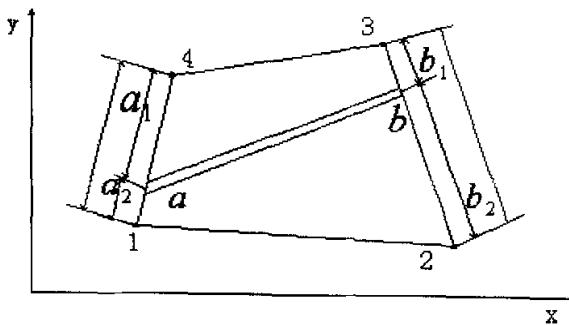


图 2-11 钢筋的等参四边形四结点单元示意图

当仅单元结点 1 发生位移 $u_1 = 1$ ，而其余位移均为 0 时，由几何关系可知： $\frac{u_a}{a_2} = \frac{u_1}{l_1}$

故有 $u_a = \frac{a_2}{l_1}$ 。同理，当 $v_1 = 1$ ，其余结点位移均为 0 时，可推得 $v_a = \frac{a_2}{l_1}$ 。当 $u_2, v_2 \dots u_4, v_4$

分别等于1而其它位移等于零的时候,可以推得钢筋结点位移 $\bar{\delta}_s$ 与单元结点位移 δ_e 之间的关系,具体表达式为:

$$\{\bar{\delta}_s\} = \begin{bmatrix} u_a \\ v_a \\ u_b \\ v_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{a_2}{l_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{a_1}{l_1} & 0 \\ 0 & \frac{a_2}{l_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{a_1}{l_1} \\ 0 & 0 & \frac{b_2}{l_2} & 0 & \frac{b_1}{l_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{b_2}{l_2} & 0 & \frac{b_1}{l_2} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ u_3 \\ v_3 \\ u_4 \\ v_4 \end{bmatrix} = [R]\{\delta_e\} \quad (\text{式 2-10})$$

其中, $[R]$ 可称为坐标转换矩阵,它表达了 4×1 阶的钢筋结点位移与 8×1 阶的四边形单元结点位移之间的转换关系。

由平衡关系,用类似的方法可以推得,

$$\{F_e\} = [R]^T \{\bar{F}_s\} \quad (\text{式 2-11})$$

将 $\{\bar{F}_s\} = [\bar{K}_s]\{\bar{\delta}_s\}$ 及 $\{\bar{\delta}_s\} = [R]\{\delta_e\}$ 代入上式可得,

$$\{F_e\} = [R]^T [\bar{K}_s] R \{\delta_e\} = [K_s]\{\delta_e\} \quad (\text{式 2-12})$$

其中 $[K_s] = [R]^T [\bar{K}_s] R$ 即为钢筋对整个四边形单元的贡献矩阵。具体计算中,可首先求得钢筋单元的 4×4 阶单元钢筋矩阵 $[\bar{K}_s]$,然后转换为 8×8 阶的贡献矩阵,并将它叠加到整体单元刚度中去。即是

$$[K_{sc}] = [K_c] + [K_s] \quad (\text{式 2-13})$$

利用类似的方法还可以求得有钢筋的等参八结点四边形单元和带钢筋模的等参八结点六面体单元的刚度矩阵。

3、整体式模型^[21]

在整体式有限元模型中,将钢筋弥散于整个单元中,并把单元视为连续均匀的材料,这样就可用式,

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\} \quad (\text{式 2-14})$$

求得单元的刚度矩阵。与分离式不同,它求出的是综合混凝土和钢筋为一个单元的刚度矩阵,这一点与组合式相似。它与组合式模型不同之处在于,它不是分别求出混凝土和钢筋的刚度矩阵再叠加,而是一次就求得综合的单元刚度矩阵。因而它运用了式 2.8,不过应将其中的弹性矩阵改成两部分的和。

$$[D] = [D_c] + [D_s] \quad (式 2-15)$$

式中, $[D_c]$ 为混凝土的应力应变矩阵。 $[D_s]$ 是等效钢筋应力应变矩阵

$$[D_c] = E_s \begin{bmatrix} \rho_x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \rho_y & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \rho_z & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (式 2-16)$$

式中, E_s 为钢筋的弹性模量; ρ_x , ρ_y 和 ρ_z 分别是沿 x , y 和 z 方向的配筋率, 如果它们不同, 则单元的刚度将是个向异性的。

4. 结论

本节主要论述了有限元分析中常用的钢筋单元, 用组合单元的方法模拟钢筋的加筋作用^[22]。

§2.2.2 钢筋传力杆对脱空水泥混凝土路面疲劳寿命的影响

在新建路面初期, 钢筋传力杆对改善接缝处的性能影响并不明显, 因而, 假定水泥混凝土板沿接缝处完全断裂, 分析钢筋传力杆的加筋作用。

模型其它参数和结构同上, 钢筋传力杆的 $E=200000\text{MPa}$, $\nu=0.15$, 直径 $R=30\text{mm}$, 长度 $L=40\text{cm}$ 。

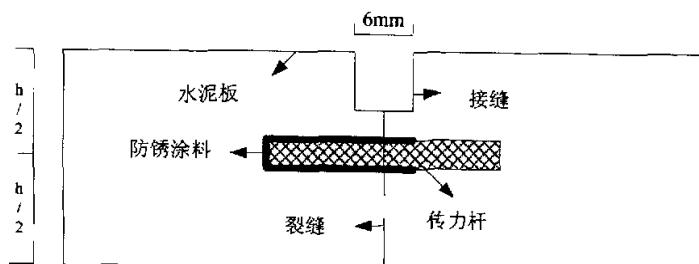


图 2-12 钢筋传力杆力学计算模型

1. 传力杆对接缝处位移的影响

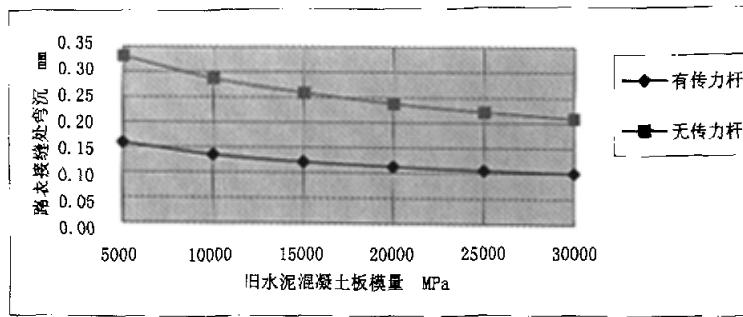


图 2-13 板沿接缝处断裂后传力杆对不同强度路表接缝处的弯沉影响

图 2-13 显示当新板沿接缝处断裂以后, 缩缝钢筋传力杆的存在可以传递荷载至相邻板, 加强了路面的整体承载能力, 可以较明显的降低行车荷载路面的不利影响, 降低接缝处的弯沉差, 从而减轻对加铺层底的应力集中, 应尽量设置传力杆。

2. 传力杆对脱空混凝土板使用寿命的影响

为了分析传力杆提高路面整体性的作用, 假定板沿接缝处断裂, 定量分析钢筋传力杆提高路面整体性的作用, 其计算数据汇总见表 2-10。

表 2-10 传力杆对脱空混凝土板使用寿命的影响

板厚 (cm)	脱空尺寸 (cm × cm)				
	60×60	90×90	120×120	150×150	180×180
20	7.20×10^6	3.13×10^4	1.04×10^4	1.18×10^3	247
22	1.38×10^7	9.82×10^5	8.84×10^4	4.27×10^3	374
24	2.15×10^8	3.73×10^6	3.88×10^5	5.98×10^3	733
26	7.11×10^8	5.75×10^7	6.25×10^6	1.13×10^6	1.05×10^5
28	1.53×10^9	4.22×10^8	5.77×10^7	2.78×10^7	8.62×10^6

由上述表中的数据可以得知:

- 1) 通过对比表 2-9、表 2-10, 可以发现, 使用传力杆后, 可以明显提高水泥混凝土路面的整体性, 降低接缝处的位移, 从而有效减小水泥混凝土板底应力, 大大提高水泥混凝土板的使用寿命。
- 2) 对比可以发现, 在该模型下, 钢筋传力杆可以较明显的提高脱空水泥混凝土板的使用寿命, 对比表明其提高幅度大约在 15%~25%。
- 3) 建议在计算缩缝设传力杆的水泥混凝土路面, 其素混凝土板底计算应力应该乘以 0.8~0.85 的折减系数。

§2.3 分离式水泥混凝土加铺层计算模型的确定

§2.3.1 设计控制指标的确定

尽管在旧水泥混凝土路面上进行新板补强(错缝铺设水泥板)可以明显消散荷载传递至旧路接缝处的荷载, 改善旧路面的不均匀支撑状况, 使得其上再加铺沥青混凝土罩面后, 沥青加铺层底的应力集中现象得到明显改善。但由于水泥板是刚度较大的材料, 旧板处的不均匀支撑会对新板产生非常大的层底弯拉应力, 降低加铺层的疲劳寿命, 因而, 该种复合式

加铺层设计控制指标为新加铺层层底弯拉应力 σ ，即以新加铺层疲劳寿命为控制指标。

§2.3.2 设计模型的确定

1、计算模型的几点说明

a) 地基

旧水泥混凝土路面往往是在土基上铺设具有一定厚度的基层（各种碎、砾石或灰土、水泥稳定粒料层等），然后铺设水泥混凝土面层。在我国现行刚性道面设计方法中，采用弹性半空间体无限大板的理论验算板中应力。对设有基层的刚性道面，如果能够采用双层地基上的板的理论，则较为理想。但考虑到加铺层设计实际，地基参数 E_c 是通过 FWD 道面测试系统直接得出，加铺后采用该值仍是保守的，偏于安全，加铺后的道面板强度势必增加。

此外，新路设计可以考虑基、垫层各层厚度，考虑最优组合的层状体系，而加铺层设计，其下部各层厚度已经确定，回旋余地较小。因此，我们直接把基、垫层和土基层视为一体，称为地基，不再细分。认为地基沿水平方向无限延伸。

b) 原道面板与地基的层间界面假设考虑

对于设计参数的计算，除了脱空区域板与基层分离外，本文假定除脱空部分外，旧水泥混凝土板与旧路基层间连续。

c) 分离式加铺层中隔离层的考虑

隔离层材料的性质决定了它传递相对于垂直荷载很小的水平荷载，而且隔离层厚度很小，对加铺层厚度计算影响较小，因此考虑加铺层与原道面完全光滑接触。认为在传递变形时，隔离层能够完全传递，即加铺层底部的挠度值与对应原道面顶部的挠度值相等。

§2.3.3 设计参数的选择以及参数的确定

由第二章节的计算得知，当脱空超过一定高度时，水泥板处于悬臂梁受力状态，并且随着脱空高度的增加，其应力基本不变，因而假定模型处于悬臂梁这一最不利受力状态，不再考虑脱空高度 h 的变化，对于旧水泥混凝土路面加铺分离式水泥混凝土板这一分离式加铺层结构来说，主要需要三个设计参数：

- 1) 基层顶面当量回弹模量 E_c ;
- 2) 水泥混凝土板脱空量 L ;
- 3) 加铺层设计厚度 h ;

以上述三个指标设计的水泥混凝土加铺层厚度满足疲劳寿命即认为合格。

1、基层顶面当量回弹模量 E_c

旧水泥混凝土路面在大修改造之前，通常会利用 FWD 对路面进行无损检测。对旧水泥混凝土路面进行评价。由于旧水泥混凝土面层下的基层顶面当量回弹模量是加铺层设计的重要参数之一。面层下的基层顶面模量难以直接测到，但混凝土路表弯沉是路面结构刚度特性的综合反映，因此，应用 FWD 实测路表弯沉，并按弹性地基板理论反算基层顶面模量 E_c 的方法是可行的，这可以由软件直接得出，比较快捷。当然，路面结构理论模型与路面实际状况之间存在一定的差异，实际应用中可以掀开旧板测量来验证。

唐伯明等人做过这样的试验：在新建路面基层顶部采用 30cm 直径的承载板测弯沉，换算基层顶面模量，当路面建成后，在路面采用 FWD 检测，发觉结果非常接近，认为可以直接采用。

因而，本文主要利用 FWD 测得基层顶面当量回弹模量 E_c 。结合全线 125km 旧路面板的 FWD 检测数据，选择试验段检测数据见表 2-11，从而为基层顶面当量回弹模量设计数值分级提供依据。

表 2-11 全桂路试验段 FWD 路面结构强度检测汇总

序号	桩号	锤数	荷载(kPa)	弯沉(μm)							面层模量E1(MPa)	基层顶当量回弹模量Et(MPa)	垫层模量(MPa)
				D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7			
1	K268+500	1	688.0	162.8	150.4	158.4	140.5	135.7	113.1	91.2	8336.5	125.8	25.1
2	K268+495	1	702.0	122.0	116.7	112.7	110.6	101.5	88.6	75.0	13125.0	175.2	29.3
3	k268+490	1	705.0	119.0	114.1	108.0	106.3	95.1	80.9	68.5	11588.8	204.8	34.0
4	k268+485	1	688.0	138.3	133.1	129.4	126.7	117.3	103.0	88.4	12909.3	142.6	23.5
5	k268+480	1	695.0	187.1	179.5	153.0	159.1	123.5	100.0	80.1	4002.0	218.3	35.2
6	k268+475	1	702.0	112.8	109.1	108.0	102.7	97.8	86.8	74.9	18428.1	163.9	26.7
7	k268+470	1	686.0	128.4	121.7	118.9	116.2	106.8	94.3	80.8	13719.3	160.5	26.2
8	k268+465	1	691.0	98.5	96.5	94.1	89.3	82.4	73.7	63.7	18454.9	198.3	33.0
9	k268+460	1	704.0	144.7	138.1	138.4	129.8	126.1	111.4	95.6	14619.9	127.6	20.8
10	k268+455	1	690.0	147.3	146.4	131.0	144.9	117.3	103.0	75.4	7191.9	162.4	31.5
11	k268+450	1	694.0	93.2	88.6	88.7	87.6	77.4	70.8	72.0	34466.9	210.2	23.1
12	k268+445	1	692.0	121.8	114.3	122.4	105.2	120.0	101.0	81.4	20002.0	112.8	20.9
13	k268+440	1	708.0	115.6	115.7	110.9	114.2	93.3	84.5	84.8	19936.8	182.8	24.2
14	k268+435	1	707.0	115.5	110.9	107.4	106.5	97.1	85.7	73.2	15750.3	179.1	29.5
15	k268+430	1	694.0	122.0	116.6	114.8	110.9	104.3	91.2	77.8	15083.3	159.9	26.8
16	k268+425	1	687.0	123.9	120.3	115.4	118.1	104.5	93.2	77.8	13740.4	159.2	27.0
17	k268+420	1	701.0	164.8	166.6	143.8	149.9	122.1	101.1	80.8	5583.9	183.3	33.0
18	k268+415	1	698.0	103.8	104.3	100.1	99.2	89.5	80.4	81.6	30878.9	175.6	20.2
19	k268+410	1	696.0	93.7	87.2	87.9	83.8	80.9	71.8	61.8	23164.7	202.8	31.6
20	k268+405	1	697.0	104.5	99.1	99.7	92.6	92.6	82.5	70.7	22640.8	168.0	26.2
21	k268+400	1	699.0	116.4	111.7	107.0	105.5	94.7	81.4	68.6	12511.8	195.4	34.1
22	k268+395	1	685.0	118.9	115.6	109.8	109.2	99.2	90.1	70.6	13087.1	167.9	30.2
23	k268+390	1	712.0	110.8	106.9	102.3	101.0	91.2	81.0	70.1	16247.4	197.0	31.7
24	k268+385	1	686.0	203.8	183.9	178.6	167.1	145.3	116.2	89.5	4050.1	160.3	29.7
25	k268+380	1	701.0	104.8	99.8	97.8	94.3	88.6	78.5	67.4	18438.0	192.1	31.0
26	k268+375	1	704.0	92.8	89.8	86.2	83.9	77.6	69.1	59.0	19823.4	223.4	36.4
27	k268+370	1	678.0	104.6	98.7	98.0	98.0	85.7	75.5	60.6	13292.7	198.5	36.6
28	k268+365	1	695.0	96.5	95.1	92.3	93.1	82.3	75.4	64.4	20732.9	190.8	30.9
29	k268+360	1	691.0	103.6	100.6	97.7	97.0	90.8	82.0	73.0	24118.9	172.0	24.5
30	k268+355	1	695.0	107.5	104.3	100.5	99.7	91.2	80.8	70.1	17780.2	183.9	29.5
31	k268+350	1	697.0	103.5	97.8	102.2	92.4	100.1	98.1	93.9	19817.8	121.0	3.3
32	k268+345	1	704.0	95.7	94.1	86.3	94.7	78.4	70.8	64.1	20540.0	230.9	33.1
33	k268+340	1	691.0	89.1	87.0	85.2	83.7	73.8	67.9	56.1	19211.9	217.8	37.7
34	k268+335	1	703.0	115.0	113.2	105.5	113.7	95.8	84.0	71.1	13770.7	185.5	31.6
35	k268+330	1	693.0	96.7	92.4	90.2	87.5	83.2	75.5	68.2	26875.9	194.0	26.3
36	k268+325	1	686.0	200.7	174.8	165.4	153.1	134.2	107.5	82.9	3916.4	196.6	33.1

37	k268+320	1	691.0	123.4	120.3	115.9	116.9	105.3	95.4	84.1	17528.5	152.9	23.0
38	k268+315	1	707.0	117.6	111.9	113.2	107.9	105.8	97.1	81.7	22839.9	140.5	21.2
39	k268+310	1	683.0	86.3	82.0	79.8	78.0	72.8	65.8	57.9	25118.4	227.0	33.2
40	k268+305	1	708.0	103.0	92.8	96.3	88.4	89.7	82.7	74.6	33428.4	177.8	21.2

鉴于全线检测汇总,有限元分析时将旧路基层顶面当量回弹模量 E_r 分为 120MPa、140MPa、160MPa、180MPa、200MPa、220MPa、240MPa 共七个顶面当量回弹模量计算等级。

2、板底脱空度 L

根据大量实体工程的实践检验,以及实践中板角断裂的宽度(板角断裂通常为 70~150cm),选定计算时脱空度的分级标准为 60cm×60cm、90cm×90cm、120cm×120cm、150cm×150cm、180cm×180cm 共五种脱空度等级。

3、板厚 h

分析时主要选择板厚分别为 h=20cm、22cm、24cm、26cm、28cm、30cm 共六种厚度等级。

这样,需要计算共 $7 \times 5 \times 6 = 210$ 个计算模型,其它的组合可插值得到。

4、分析模型

由于错缝铺设分离式水泥混凝土板可以较好的将接缝荷载扩散至板中,采用新板锯缝对应于旧板板中模型,临界荷位为新板纵缝边缘中部,模型见图 2-14,荷载分布形式简化见图 2-5。

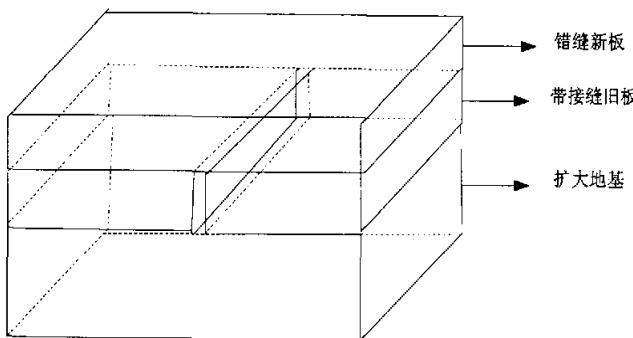


图 2-14 错缝铺设分离式加铺层计算分析模型

§2.4 旧水泥混凝土路面分离式加铺层设计

§2.4.1 混凝土路面可靠度设计简介

在新版水泥路的设计规范中,引入了可靠度设计概念,而加铺层的可靠度设计还没有明确指标,可以引用新建路面可靠度设计标准用于旧路加铺层设计。

路面结构的可靠性是指由土基、基层和面层组成的路面结构,在规定的基准期内,在规定的环境条件和行车荷载条件下,完成预定功能的能力。而完成预定功能的概率就是路面结构的可靠度,或者表述为,在规定的时间和条件下,路面使用性能满足预定要求的概率。

在可靠度概念中,应明确两方面的含义:

- 1) 设计基准期:指路面设计取用的使用时间。需要指出的是,设计基准期不是路面结构的使用寿命,而是指计算路面结构可靠度时,考虑各项基本度量与时间关系所取

用的基准时间。在这个时间段内关于路面结构可靠性的分析是有效的。虽然它与路面寿命有一定的联系,但并不是一旦路面的使用年限超过路面的设计基准期路面就完全报废,而是路面结构的可靠度下降。

- 2) 功能:对于路面即为路用性能,包括功能性和结构性两个方面,预定使用性能是用规定温湿状态下特定的临界状态表示的。可以采用断裂等结构性指标,或者采用平整度等功能性指标,或者采用服务能力指数等综合指标来表征路面在某一时刻的使用性能,并规定使用期末的要求水平。

对应不同的设计方法和设计指标与标准,路面结构的可靠度可以有不同的涵义。我国水泥混凝土路面结构设计是以弯曲开裂为设计指标,并以疲劳开裂损坏,即行车荷载左右产生的荷载疲劳应力和温度梯度作用产生的疲劳应力之和不超过混凝土弯拉强度的设计值作为设计标准。

根据其极限状态,水泥混凝土路面结构可靠度为:在设计基准期内,面层板在行车荷载和温度梯度共同作用下不产生结构疲劳断裂的概率,即:

$$P_s = P \left(\left(\sigma_{pr} + \sigma_{ps} \right) / f_r \right) \quad (式 2-17)$$

路面结构设计中,对路面结构疲劳寿命 N 影响较大的参数为混凝土的弯拉强度,板厚,基层定面综合回弹模量以及温度梯度。

对于加铺层设计,在大量有限元计算的基础上,采用规范的主要设计参数变异水平分级标准。其可靠度系数采用

对于旧水泥混凝土路面加铺层设计,可靠度系数取高限偏于安全。

§2.4.2 旧水泥混凝土路面复合式加铺层设计流程

旧水泥混凝土路面分离式加铺层主要设计流程为:

通过 FWD 路面无损检测技术,评价路面基层顶面当量回弹模量 E_r ,根据计算诺模图插值得到不同脱空度以及不同基层状况的路面板的应力值,验证其是否满足疲劳设计寿命。

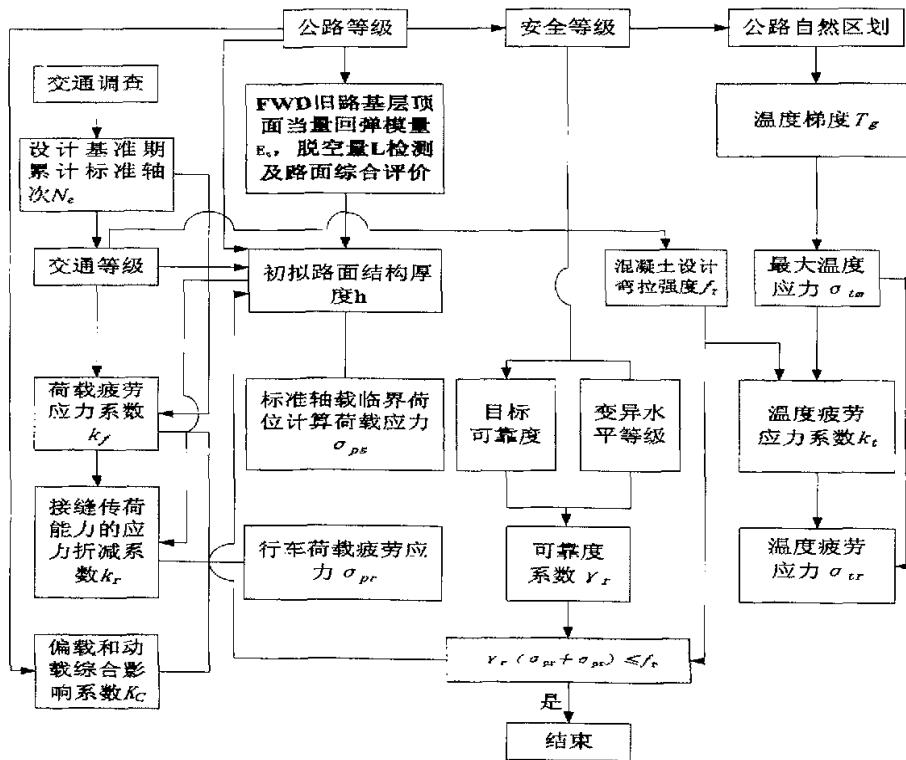


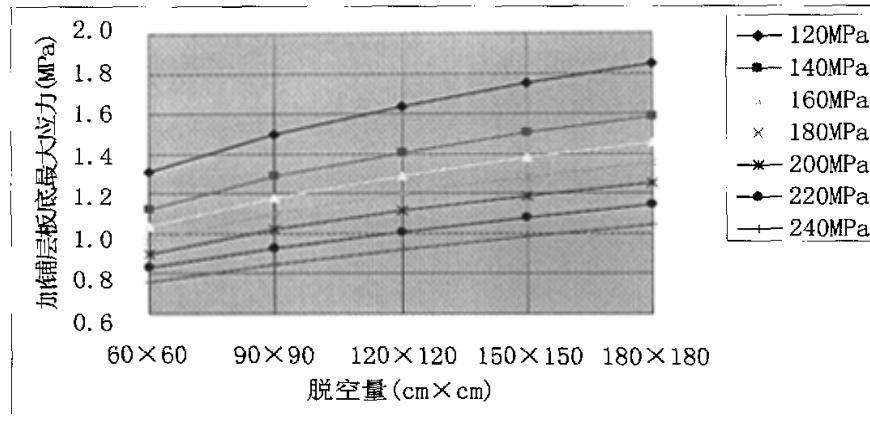
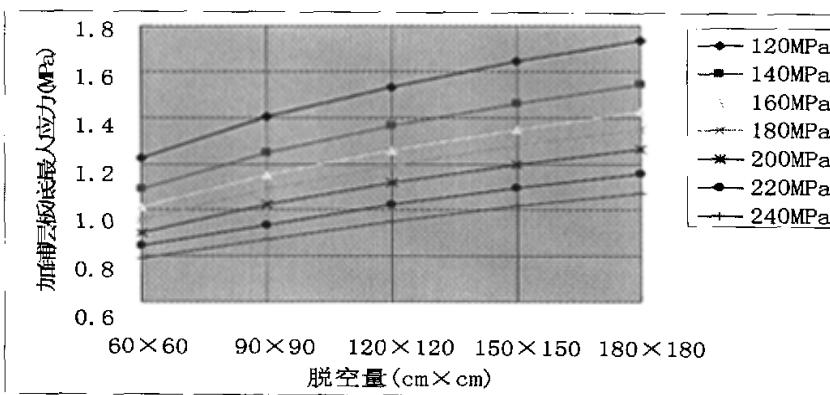
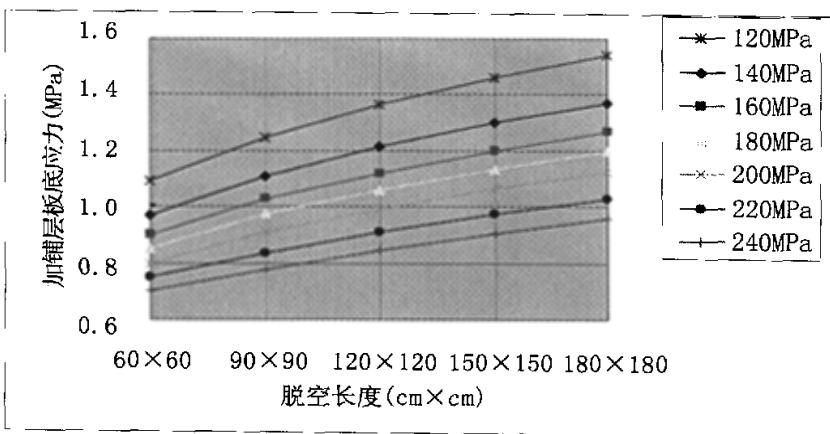
图 2-15 旧水泥混凝土路面复合式加铺层设计流程图

注：节 2.1.2 分析得知，由于脱空度对分离式混凝土加铺层的温度疲劳应力影响不大，计算时可以直接采用 2002 版规范规定的温度疲劳应力计算公式得到，而脱空混凝土板的荷载计算应力由有限元计算程序得出，再乘以荷载应力疲劳系数，最后检验是否满足加铺层的设计标准，即行车荷载产生的荷载疲劳应力和温度翘曲应力之和不超过混凝土弯拉强度的设计值。

§2.4.3 脱空水泥混凝土分离式加铺层计算荷载应力分析

本节主要通过大型商业有限元软件，计算不同组合的设计指标下（不同板厚、脱空度、以及不同基层顶面当量回弹模量），水泥混凝土加铺层临界荷位处的计算荷载应力。

根据表 2-11 显示的全桂路基层顶面当量回弹模量实测检测数据汇总，选取了一定代表性的基层顶面当量回弹模量设计代表值，其它的数据可以通过插值得到。

图 2-16 不同 E_t 时 20cm 厚分离式加铺层设计计算图图 2-17 不同 E_t 时 22cm 厚分离式加铺层设计计算图图 2-18 不同 E_t 时 24cm 厚分离式加铺层设计计算图

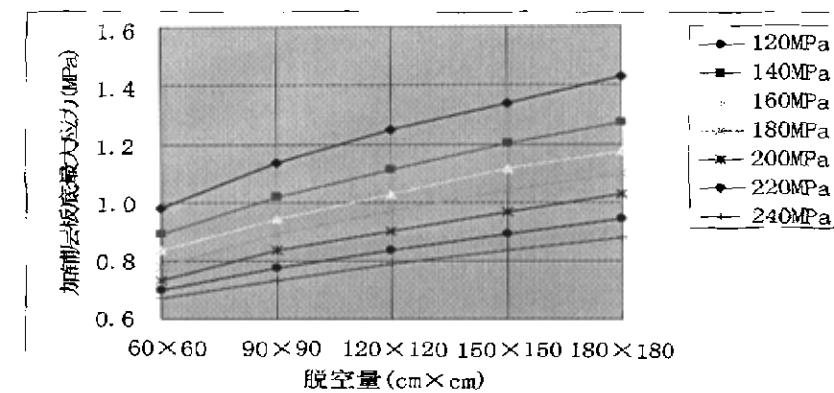


图 2-19 不同 E_c 时 26cm 厚分离式加铺层设计计算图

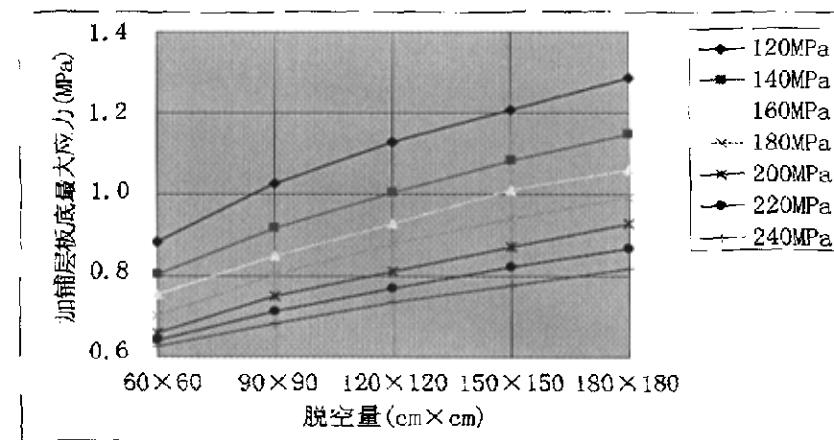


图 2-20 不同 E_c 时 28cm 厚分离式加铺层设计计算图

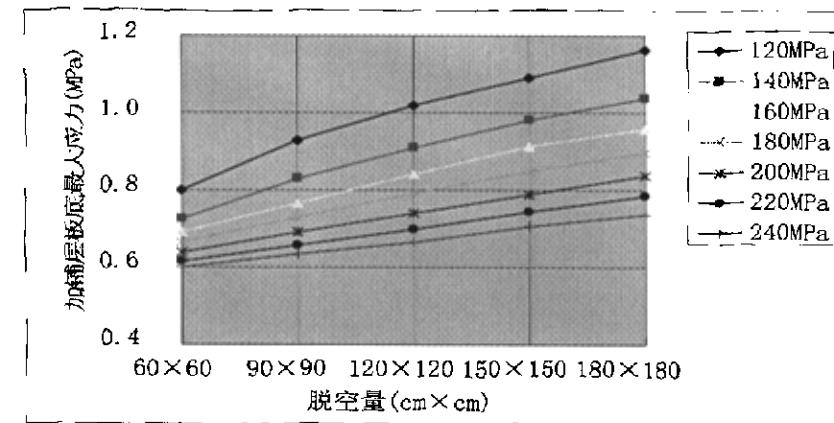


图 2-21 不同 E_c 时 30cm 厚分离式加铺层设计计算图

通过对上述各设计指标组合下力学计算图,可以得知:

- 1) 随着板厚的增加, 脱空度对加铺层的影响逐渐减小。
- 2) 脱空量不变时, 随着板下基层顶面当量回弹模量 E_r 的增加, 板底应力减小, 当 E_r 不变时, 脱空量越大应力增加越快。
- 3) 对比各表中脱空度较小时的数据当板厚增加到 26cm 后, 再增加板厚对层底应力的影响逐渐减小, 由于旧路处治后依然有一定的错台或脱空, 而错台的存在将加剧水泥板底的应力, 建议对于旧水泥混凝土路面分离式加铺层, 采用 24cm 以上的厚度。
- 4) 脱空度对加铺层有一定的影响, 尤其当加铺层厚度低于 24cm 时, 脱空对加铺层影响较大, 基于前一章节的研究, 建议在一定保证率的基础上适当增加板厚 1-2cm 可以获得较好的长期经济效益。
- 5) 由于上述计算的是未设传力杆的素混凝土路面应力, 基于节 2.2.2 的研究, 在计算设传力杆的混凝土加铺层时, 乘以 0.8~0.85 的折减系数。

§2.5 本章小结

通过对实体工程多处水泥混凝土路面板下脱空形态进行现场试验研究, 获得脱空区的形态分布特征, 引入脱空度概念, 并据此利用大型商业有限元软件 ABAQUS 定量地评价板下脱空、荷载以及钢筋传力杆对水泥混凝土路面板使用寿命的影响。通过加铺改造工程的实践检验, 基于 FWD 无损检测技术对路面参数的获取, 利用 ABAQUS 大型有限元软件, 采用 20 节点等参实体三维单元, 评价缩缝设钢筋传力杆的脱空水泥混凝土路面分离式加铺层的设计, 建立一套道面检测评价和加铺层设计系统。主要结论如下:

- 1) 水泥混凝土路面板下脱空区沿横缝近似对称分布, 当存在板角脱空时, 脱空区域分布为近似的三角形楔形体, 距板中愈近脱空高度愈小, 距板边角愈近脱空高度愈大。另外, 板缝脱空也一定程度上存在, 研究认为板缝完全脱空是从板角脱空发展的。
- 2) 对于不同脱空深度, 当脱空尺寸小于 60cm×60cm 时, 板角荷载作用下板底应力小于或接近标准轴载在板边中部边缘临界荷位产生的最大弯拉应力, 表明脱空区不大时, 对路面板的使用寿命影响不大。
- 3) 对于脱空度这一概念, 认为相对于脱空高度来说, 脱空面积的大小对板底应力的影响最大。
- 4) 力学分析认为, 标准轴载作用下, 板角脱空高度超过 3mm 时, 随脱空高度的增加, 板的受力状态几乎没有影响。
- 5) 力学分析表明, 随着荷载的增加, 脱空区板底应力几乎呈线性增长, 可以得知脱空区重载车辆的作用是造成脱空板很快疲劳断裂的主要原因。
- 6) 旧水泥混凝土路面上直接加铺沥青混凝土面层这类结构, 其主要承重层仍是旧水泥混凝土板, 沥青面层几乎不增加路面刚度, 从脱空板的有限元力学分析认为, 板下脱空区域的处治效果是沥青加铺层成败的关键。调研得知, 旧路况较差, 或板底脱空处治较差的路段沥青加铺层通常破坏较快。
- 7) 脱空水泥混凝土路面板的温度应力分析表明, 随着脱空区的增大, 脱空板底温度应力有一定下降趋势, 表明板底束缚变小, 但是变化幅度相对来说较小, 而分离式双层板仅需计算上层板的温度疲劳应力, 认为在分析分离式水泥混凝土加铺层的温度应力时可以不考虑脱空度的影响。
- 8) 基于脱空水泥混凝土路面板应力分析认为, 脱空区的存在极大的降低了路面板的使用寿命, 对于重交通道路, 基于脱空度考虑的水泥混凝土板的设计厚度应该达到 26~28cm 以上。

- 9) 钢筋传力杆可以有效提高路面的整体性和应力协调性能, 经有限元分析认为, 钢筋传力杆可以降低板接缝处的弯沉变形, 减小水泥混凝土板底拉应力, 从而提高水泥混凝土板的使用寿命, 经计算其大概可以提高路面板使用寿命的 15%~25%。
- 10) 建议在计算缩缝设钢筋传力杆的水泥混凝土路面, 其素混凝土板底计算应力应该乘以 0.8~0.85 的折减系数。
- 11) 提出基于 FWD 无损检测技术对路面参数的获取, 引入脱空度概念, 通过大量有限元计算绘制脱空水泥混凝土路面加铺层设计应力计算图, 从而更好的符合道路实际使用状况。
- 12) 不同设计指标数值的应力计算值可以通过线性插值得到。

第3章 设 ISAC 复合夹层沥青加铺层断裂力学分析

本章基于断裂力学理论, 主要介绍 ISAC 夹层在伊利诺斯州的研究与应用。并利用商业有限元软件 ABAQUS, 基于断裂力学理论, 采用平面 8 节点四边形单元模型分析 ISAC 复合夹层在抵抗车辆荷载和温度荷载作用下旧水泥混凝土路面沥青加铺层中反射裂缝的效果。

§3.1 断裂力学基本概念

§3.1.1 裂纹扩展的三种基本形式

断裂力学是研究含裂缝的构件在各种环境下(包括荷载作用、温度变化、湿度变化等)裂缝的平衡、扩展和失稳规律, 以及其强度的一门学科^[35]。建筑物的建设过程中不可避免地会留下一些裂缝, 这些裂缝在某种条件下会失稳扩展。按照它们在荷载作用下的扩展形式的不同, 可以分成三种基本类型:

- 1) 张开型裂缝(I型), 如图 3-1 (a) 所示。正应力 σ 和裂缝面垂直, 在正应力作用下, 裂缝尖端处左右两个平面张开而扩展, 且裂缝扩展的方向和 σ 作用方向垂直。这种裂缝扩展模式称为张开型裂缝, 也称为 I 型裂缝。
- 2) 滑开型裂缝(II型), 如图 3-1 (b) 所示。剪应力 τ 和裂缝表面平行, 而且它的作用方向也与裂缝方向垂直。在剪应力作用下裂缝的上下两个平面相对滑移而扩展。这种裂缝扩展模式称为撕开型裂缝, 或称为 II 型裂缝。
- 3) 撕开型裂缝(III型), 如图 3-1 (c) 所示。剪应力 τ 和裂缝表面平行, 而且它的作用方向也与裂缝方向平行。在剪应力作用下裂缝的上下两个平面撕裂扩展。这种裂缝扩展模式称为撕开型裂缝, 或称为 III 型裂缝。

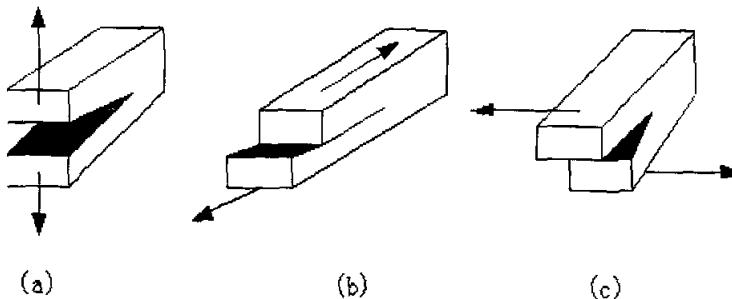


图 3-1 裂缝扩展模式

通常认为在路面使用初期主要由温度应力引起板产生水平位移从而产生张拉型裂缝, 随着裂缝的产生, 形成荷载尤其是重载车辆所产生的剪切型裂缝是裂缝发展的主要原因。

§3.1.2 裂纹尖端的应力场

这里以 I 型裂缝为例, 分析裂缝尖端处的应力场。由于裂缝在结构中是微小的, 为简化, 取一块长度和宽度均无限大的平板, 在板中间有一条长度为 $2a$ 的裂缝, 如图 3-2(a) 所示。设平面在 x 方向 y 方向均有应力 σ 作用。为了说明裂缝尖端附近的应力和位移状态,

将坐标原点设置于裂缝尖端处，并采用 r 、 θ 的极坐标，如图 3-2(b) 所示。

基于弹性理论，采用复变函数为应力函数，可以求出裂缝尖端附近任一点 $p(r, \theta)$ 处的应力和位移。

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2}\right) + \dots \\ \sigma_y &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2}\right) + \dots \\ \tau_{xy} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(\sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2}\right) + \dots\end{aligned}\quad (\text{式 3-1})$$

其中 K_I 为常数。

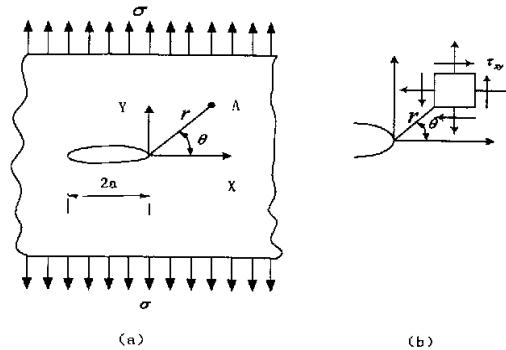


图 3-2 无限大板中的裂缝示意图

对于 Z 方向的应力，则分两种情况：

$$\sigma_z = \begin{cases} 0 & \text{(平面应力状态)} \\ \nu(\sigma_x + \sigma_y) & \text{(平面应变状态)} \end{cases} \quad (\text{式 3-2})$$

位移的计算公式是：

$$\begin{aligned}u &= \frac{K_I}{8G} \sqrt{\frac{2r}{\pi}} \left[(2k-1) \cos \frac{\theta}{2} - \cos \frac{3\theta}{2} \right] + \dots \\ v &= \frac{K_I}{8G} \sqrt{\frac{2r}{\pi}} \left[(2k-1) \sin \frac{\theta}{2} - \sin \frac{3\theta}{2} \right] + \dots\end{aligned}\quad (\text{式 3-3})$$

式中

$$k = \begin{cases} \frac{3-\nu}{1+\nu} & \text{(对平面应力状态)} \\ 3-4\nu & \text{(对平面应变状态)} \end{cases} \quad (\text{式 3-4})$$

为泊松比, G 为材料的剪切模量。从式 (4-1) 可以看出, 随着 r 的减小 (也就是越接近裂缝尖端的地方), 所有的应力分量都增大, 并且当 r 趋向无穷大时, 这些应力分量均趋向无限大, 亦即裂缝尖端处的应力场具有奇异性。

§3.1.3 应力强度因子及 J 积分判断准则

从上面的公式 (4-1) 可以看出, 只要有裂缝存在, 并且外荷载不等于零 (即使很小很小), 则裂缝尖端处的应力总是趋向无限大的。如果按照传统的强度理论, 无论作用多么微小的荷载, 都将导致结构的破坏。也就是说, 有裂缝的结构的强度是趋向于零的。但是实际情况并不是如此, 许多带裂缝工作的结构在一定的荷载作用下还是稳定的。怎样才能解释这个现象呢? 在这种情况下, 只用应力大小来判断结构的强度的方法就不适用了, 而新的用来描述结构应力场强度的力学参数就在公式 (4-1) 中。由公式 (4-1) 可知, 裂缝尖端附近的应力场与 K_I 成正比。对于同一裂缝, 同一种应力状态就具有相同的 K_I 值。 K_I 值越大, 则裂缝附近的应力随 $r \rightarrow 0$ 时趋向无限大就越迅速。所以, K_I 可以反映裂缝尖端附近的应力场强度, 它被称为应力强度因子。对于图 3-1 (a) 所示的 I 型裂缝:

$$K_I = \lim_{r \rightarrow 0} \left[\sqrt{2\pi r} (\sigma_y)_{y=0} \right] = \sigma \sqrt{\pi a} \quad (\text{式 3-5})$$

应力强度因子与应力集中系数是两个完全不同的参数。应力强度因子与应力点坐标无关, 它从总体上反映了裂缝尖端附近应力场奇异性的强弱, 其量纲为 $[FL^{-\frac{3}{2}}]$; 而应力集中系数是应力集中处最大应力与名义应力之比, 它反映了应力集中的程度, 是一个无量纲的参数。

带裂缝的无限大平板受剪应力作用时, II 型和 III 型裂缝的应力强度因子分别是:

$$\begin{aligned} K_{II} &= \tau \sqrt{\pi a} \\ K_{III} &= \tau_I \sqrt{\pi a} \end{aligned} \quad (\text{式 3-6})$$

在一般情况下, 应力强度因子的大小与荷载性质、裂缝几何形态和结构的几何形态等因素有关。现在只有几种简单情况下可以推导出应力强度因子的解析表达式。当荷载情况复杂、构件尺寸不规则时, 很难有解析法来确定应力强度因子, 此时可以用试验的方法或数值方法计算。

J 积分是由 Rice 和 Cherepanov 分别讨论裂纹问题时提出。为了避开直接计算裂纹尖端附近的弹塑性应力应变场, 提出了一个围绕裂纹尖端的围线积分, 这个积分值与积分路径无关, 为一常数, 即 J 积分的守恒性, 并认为这一常数的数值就反映了裂纹尖端应力应变场的强度, 描述了这一应力应变场的特征。

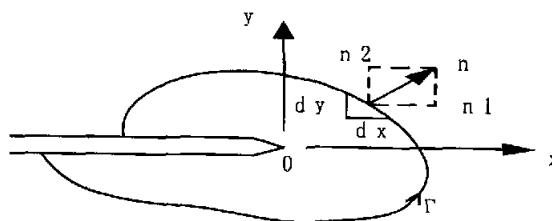


图 3-3 裂纹尖端积分回路

如图3-3所示,围绕裂纹尖端作一回路,并沿此回路作式(4-7)积分。

$$J = \oint \left(\omega dy - T_i \frac{\partial u_i}{\partial x} ds \right) \quad (式 3-7)$$

其中: ω 是在弹塑性条件下,在单调加载过程中裂纹体的应变能密度。 Γ 是自裂纹下表面的任意一点起,沿逆时针方向绕过裂纹尖端而止于裂纹上表面任意一点的任意一条曲线。 T_i 是作用在回路上弧线 ds 对应的面元素 ds, dz 上的表面力矢量,其分量为: $T_1=T_x, T_2=T_y$; u_i 是该处的位移矢量,其分量为: $u_1=u, u_2=v$; n 是线元素 ds 的外法线单位矢量,其分量即为方向余弦: $n_1=n_x=\cos(n, x), n_2=n_y=\cos(n, y)$ 。

经推导证明,在线弹性状态下, J 积分就是应变能释放率 G ,即裂纹扩展单位面积所释放出的能量。

$$\text{平面应变条件: } J = \frac{1-\nu^2}{E} K_I^2 = G_I \quad (式 3-8)$$

$$\text{平面应力条件: } J = \frac{1}{E} K_I^2 = G_I \quad (式 3-9)$$

§3.1.4 断裂韧度与断裂准则

通过上面的分析可以看出,应力强度因子反映了裂缝尖端附近应力场的强弱。以I型裂缝为例,由式(4-4)可知,随着外加应力的增大,应力强度因子也将增大。同时,在试验中发现,当应力场的强度增加到某一值时,即使外加应力不再增加,裂缝也会迅速扩展而导致构件断裂或结构发生脆性破坏。我们把这个极限值称为材料的断裂韧度,用 K_{Ic} 来表示。不同的材料具有不同的 K_{Ic} 值, K_{Ic} 值就表征了工程材料本身固有的抵抗裂缝扩展的能力,与其它力学指标(如抗压强度、屈服极限等)一样需要通过试验来确定。通过试验已经发现,断裂韧度与试件的厚度、加载速度、环境条件等因素有关。

求出了带裂缝工作构件的应力强度因子 K_I ,测定了材料的断裂韧度 K_{Ic} 后,便可以建立结构不发生断裂的条件:

$$K_I \leq K_{Ic} \quad (式 3-10)$$

对于带裂缝的无限大平板有:

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi \sigma} \leq K_{Ic} \quad (式 3-11)$$

对于II型和III型裂缝也有类似的判别准则。

由于 J 积分在线弹性条件下与 K_I 有式(4-7)的关系,所以 J 积分同样存在这样的断裂判据: $J \leq J_{Ic}$ 。

§3.2 反射裂缝的产生和发展机理

旧水泥混凝土路面上加铺沥青层后,下板的接裂缝会在加铺层表面反映出来,这种与下板接裂缝相对应的裂缝称为反射裂缝。对于反射裂缝的产生及扩展机理的认识,直接关系到反射裂缝的防治问题。反射裂缝产生的过程,通常可以分为两个阶段:产生阶段和扩展阶段。

§3.2.1 反射裂缝的产生

旧水泥混凝土路面板和其上的沥青加铺层组成的路面结构是一种特殊的路面结构,其应力应变特性与一般的弹性层状体系有较大的差别,在荷载和温度应力的作用下,沥青混凝土加铺层处于复杂的三维应力状态。车辆行驶过不连续的板体时,沥青混凝土加铺层中由于接裂缝两侧相邻板块产生竖向位移差,而出现较大的剪切应力,这种剪切应力是沥青混凝土加铺层产生荷载型反射裂缝最主要的原因。

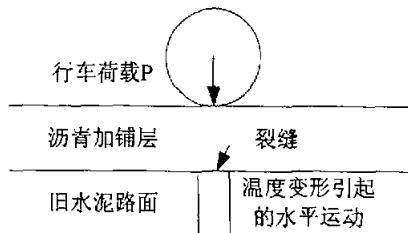


图 3-4 反射裂缝的产生

另外,由于路面暴露在大气中,受气温周期性变化的影响,沥青加铺层和旧路面板都会产生膨胀,产生温度应力。由于旧水泥混凝土路面的应力在接裂缝处不连续,因此沥青加铺层同时承受它本身以及旧路面所产生的温度应力。特别是在冬季气温较低时,沥青混凝土加铺层会因为与接裂缝对应处的拉应力过大而产生开裂,形成温度型反射裂缝。

§3.2.2 反射裂缝的扩展

沥青混凝土层中的反射裂缝从其产生到整个路面破坏,中间要经历一个裂缝扩展阶段,即反射裂缝在面层厚度方向上的纵向扩展和在其表面的横向扩展。

(1) 反射裂缝的纵向扩展

断裂力学认为,裂缝的扩展有三种位移模式:张开模式、剪切模式和撕开模式,温度应力对反射裂缝影响的模式为张开模式,行车荷载对反射裂缝影响的主要模式是张开模式和剪切模式。当车轮驶经裂缝的正上方时,以张开模式来引起反射裂缝,当车轮驶经裂缝在裂缝之前和之后的位置时,主要以剪切模式影响反射裂缝。

与张开模式相对应的温度型反射裂缝通常产生于面层的底部,而后向上逐渐扩展到面层顶面。Rigo 等人应用 SAPLIS5 程序模拟发现温度应力作用下反射裂缝的扩展路径几乎是垂直向上扩展的,但 Button 等人的“罩面试验”结果表明,当气温非常低时,裂缝产生在面层的顶面和底面,而后向面层中间扩展。

对于正荷载作用下的张开位移模式所对应的反射裂缝,一般产生于面层的底面,在周期性荷载的作用下垂直向上扩展。Brown 和 Caltabiano 等人的室内试验都证实了裂缝的这种扩展模式。在偏荷载作用时,反射裂缝以剪切模式在面层中向上扩展, Rigo 等人对其扩展路径进行了分析,认为裂缝在面层中是沿 45° 角的方向向上扩展的。

当车轮荷载（偏荷载）和温度应力共同作用于复合面结构时，Rigo 等人的分析结果显示，裂缝的扩展介于偏荷载和温度应力单独作用时裂缝扩展路径之间，比偏荷载作用时的裂缝扩展途径更垂直一些。

（2）反射裂缝的横向扩展

众所周知，反射裂缝在瞬间是不可能贯穿整个路面宽度的，除非在应力作用时，裂缝的长度已经等于或大于相对于整个路面宽度的临界长度（这里的临界长度是指当裂缝的长度接近或大于该长度时，裂缝的扩展非常快而且是不稳定的）。较为合理的发展过程是裂缝首先在路表面某些位置产生，然后再向两侧扩展。一般情况下，反射裂缝多出现在轮迹处，因为温度对反射裂缝的影响在整个路面宽度内都是相同的，而行车荷载则是以一定的频率分布在车道上的，尤其在渠化交通的道路上。

与面层开裂有关的问题是环境因素的负效应，反射裂缝一经出现，水分的浸入、氧化以及行车的反复作用，常常加速反射裂缝向四周扩展。

§3.3 ISAC 复合夹层的应用研究

美国伊利诺斯州展开了复合夹层的研究，现主要介绍其研究成果和方法。

1、ISAC 材料抗剪切性能试验和评价

1.1 ISAC 复合夹层抗剪切强度试验简介

AC 罩面和下面路面之间的滑移可以通过下列措施防止：

- 1) 增加罩面厚度降低界面的剪切应力；
- 2) 提高罩面和下面路面之间的剪切强度。

与第一解决方案相比较第二个方案不经济。在不采取任何处治措施的路段，界面间的剪切强度是通过粘结和嵌锁形成的。一旦在 AC 罩面和 PCC 板之间引入 ISAC 夹层，嵌锁作用将大为减小，所剩下的主要是橡胶沥青的粘结力提供的界面抗剪强度。

由实验室测试用来确定罩面界面的剪切强度时，三种类型的测试试件布置如下：

- 1) 无粘结界面的 AC 罩面；
- 2) AC 罩面铺筑在 PCC 路面上，层间有一粘结层；
- 3) 在层间铺设 ISAC 夹层。

测试时，尽量模拟影响 AC 罩面和 PCC 罩面之间的剪切强度的现场环境如气温，控制压力和剪切速率。

试件说明：制作一个直径为 4.9cm，高为 4.9cm 的 PCC 圆柱体试样并养护 28 天。干燥试件并涂抹适量的粘结层。剪下一直径为 4.9cm 的 ISAC 层并铺贴在粘结层的混凝土表面。在 ISAC 层的上部涂抹另一粘结层。混凝土圆柱体和 ISAC 层一起放在直径 4.9cm 的模子中，然后在上面分等厚的三层来压实 7.35cm 厚的沥青混凝土，层间剪切试验试样结构示意图见图 3-5。

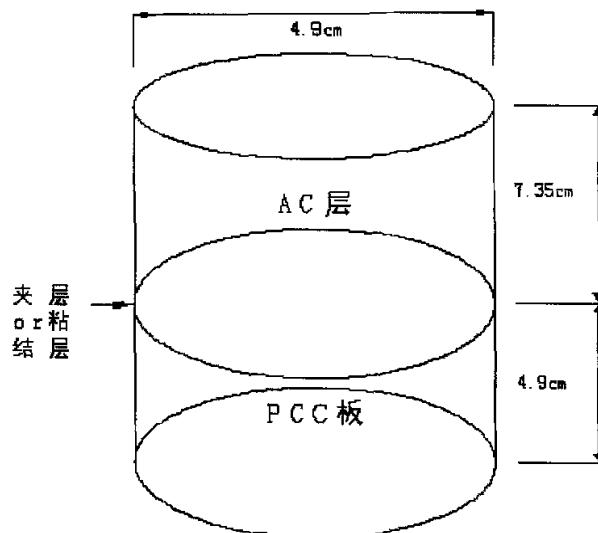


图 3-5 ISAC 剪切试验试样示意图

1.2 ISAC 复合夹层抗剪切强度试验数据

表 3-1 不同罩面厚度的界面处最大剪切应力

罩面厚度 (cm)	界面处最大剪切应力 (KPa)
6.13	2.09
7.35	1.78
8.58	1.47
9.80	1.17

表 3-2 不同温度下不同剪切速率时不同层间接触的抗剪强度

温度 (℃)	试件类型	抗剪强度 (KPa)		
		2.45 cm/min	73.5 cm/min	735 cm/min
-17.8	AC	17.17	18.56	20.37
	粘结层	6.12	5.60	4.88
	ISAC	3.83	3.63	3.16
-6.7	AC	18.46	21.14	25.30
	粘结层	8.56	8.85	8.80
	ISAC	5.40	5.60	5.17
4.4	AC	15.16	20.37	28.94
	粘结层	8.42	9.14	11.10
	ISAC	4.73	6.07	6.50
15.6	AC	11.00	19.80	26.64
	粘结层	5.88	8.37	12.77
	ISAC	2.77	5.69	8.51
26.7	AC	7.65	13.49	23.29
	粘结层	4.21	6.89	10.28

	ISAC	1.58	4.93	8.66
37.8	AC	5.17	7.89	12.72
	粘结层	3.20	4.69	6.27
	ISAC	1.24	3.25	5.55

表3-3 不同层间材料试件在0.12cm/min剪切速率下不同温度时的抗剪强度

温度(℃)	剪切强度(KPa)			
	AC	粘结层	ISAC	ISAC(改性)
-17.8	16.17	6.60	3.97	5.20
-6.7	16.60	8.27	5.26	7.51
4.4	11.53	8.04	3.83	6.44
15.6	5.69	4.26	1.20	2.30
26.7	3.68	2.39	0.29	0.62
37.8	3.44	2.30	0.10	0.31

1.3 ISAC复合夹层试样抗剪切强度测试结论:

- 对于6.13cm厚的罩面,在界面的水平面内产生的剪应力是2.09KPa,见表4-1。对于没有滑动的状况,ISAC夹层界面在作用的温度范围-8.6℃至23.6℃内其剪切强度不应该低于2.09KPa;
- ISAC夹层的存在降低了层间的抗剪切能力,所有含有ISAC层的试件沿橡胶沥青界面剪切滑移;
- 在操作的温度范围内的所有剪切速率(2.45cm/min, 73.5cm/min, 735cm/min)作用下,具有ISAC层试件其界面处的抗剪强度明显比使用粘结层的试件界面的剪应力小;
- 在操作温度范围内的高剪切速率(735cm/min)作用下,-8.6℃是ISAC层界面处剪切强度的临界温度。在-8.6℃温度下ISAC层界面产生的剪切强度4.81KPa(由表4-2内插得到)明显比没有ISAC层的界面产生的剪应力(2.09KPa)大。ISAC试样在高速剪切速率时抵抗滑移的能力是可以接受的;
- 在操作温度范围内的中等剪切速率(73.5cm/min)作用下,23.6℃是ISAC夹层界面抗剪强度的临界温度。23.6℃温度时ISAC层界面产生的剪切强度5.137KPa(由表2内插得到)远比无ISAC层的界面剪应力(2.09KPa)大。ISAC试件在中等剪切速率时抵抗滑移的能力是可以接受的;
- 在操作温度范围内的低剪切速率(2.45cm/min)作用下,23.6℃是ISAC夹层界面剪切强度的临界温度。23.6℃温度下ISAC层界面产生的剪切强度1.91KPa(由表4-2内插得到)低于没有ISAC层的界面产生的剪应力(2.09KPa)。因此认为ISAC层在较慢速率的剪切作用下抵抗滑移是不够的;
- 基于这一评价,ISAC芯样材料在低剪切速率下抵抗滑移是不可靠的。需要通过添加改性剂来改善橡胶沥青的性能(劲度和温度敏感性)以提高ISAC层的抗剪效果,同样以较慢的剪切速率来检验其抗剪效果;
- 通过添加石灰作为改性剂来提高低速剪切时的抗剪强度,获得了比较明显的效果,经过改性后的ISAC复合夹层能够抵抗层间的剪切力,见表4-3。

2、ISAC抵抗反射裂缝效果试验

按照上述抗剪测试得到的材料,制作ISAC复合夹层。在现场测试ISAC之前,在实验室模拟现场条件来评价其性能是十分重要的。认为温度变化是引起反射裂缝产生的主要原因,所以本研究不分析在交通荷载作用下ISAC夹层抵抗反射裂缝的能力。用一种机械装置来模

拟板中的温度应变，接缝以很慢的速率张开和闭合。观测罩面裂缝的传播，ISAC 的性能通过比较铺设 ISAC 夹层和没有铺设 ISAC 夹层处置路段达到破坏的次数来评价^[36]。

2.1 测试设备和方法

图 3-6 显示了测试装置的组成部分。测试装置包括一个固定的箱形截面和在滚轮上可水平移动的箱形截面。14.7cm 宽 228.8cm 长的路断面由 12.25cm 厚的 PCC 板，ISAC 夹层和 6.13cm 厚的 AC 罩面组成并铺在这两个箱形截面上。可移动的箱形截面与液压夯锤相连可以极慢的速率 (0.00392cm/min) 关闭和张开 PCC 板的接缝以模拟季节和日温度变化。荷载传感器安放在可移动箱形截面和液压夯锤之间以显示张开和关闭 PCC 板接缝时液压夯锤所施加的力。LVDT 装置放在固定和可移动的箱形截面中间以显示这两个箱形截面的相对位移。测试装置放在环境室中，测试时温度保持-1.1°C。为了在这两个箱形截面上固定断面梁，使用两个带有螺栓的 9.2cm×19.6cm×0.6cm 的钢板，整体装置见图 3-6。

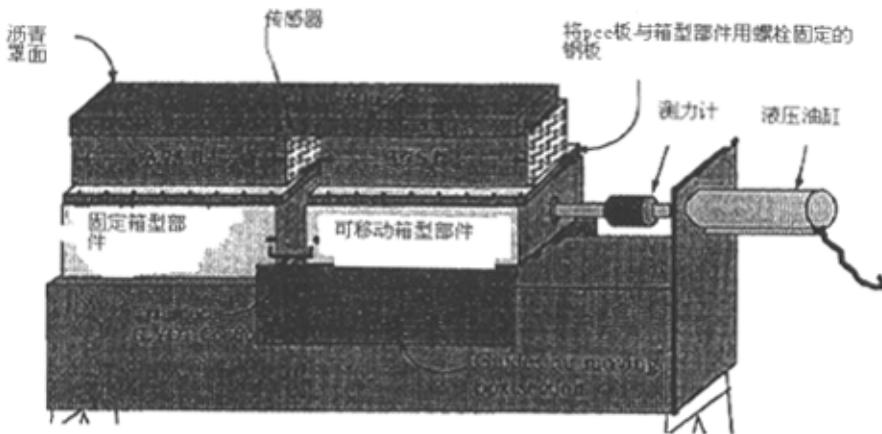


图 3-6 ISAC 抵抗反射裂缝试验装置

2.2 试验及试件说明

制作的试样为在 PCC 板洒布粘层油后铺 ISAC 复合夹层再铺 6.13cm 沥青罩面以及不铺 ISAC 复合夹层两种，为了能用肉眼观测裂缝发展将熟石膏抹在接缝处的罩面上方。

测试时，分别对比了不铺 ISAC 试件（称为控制段）以及铺 ISAC 复合夹层的试件分别承受 0.18cm、0.27cm、0.33cm、0.39cm、0.49cm 5 种接缝位移时抵抗反射裂缝的效果。

2.3 ISAC 抵抗反射裂缝效果实验室试验结论

- 1) 不铺设 ISAC 复合夹层的试件在第一次循环出现裂缝，在第 7 次循环中接缝上方的 AC 罩面完全开裂。
- 2) 在与实际环境相似的测试环境下，用 ISAC 系统处治的 AC 罩面的性能非常好。使用 ISAC 夹层后，罩面的应变明显减小，破坏的循环次数明显增加。即使在后面的测试中（测试 2 至测试 5），不断增加板的接缝张开位移，在测试 5 中板的位移增加至 0.49cm 时（是无夹层试样的 3 倍），直到 30 次循环作用后，罩面仍然完好无损，并且罩面和 ISAC 土工织物承受了 158 次循环。此时在罩面中出现较细的裂缝，但是 ISAC 土工织物仍然完好，与罩面一起承受约 5.25KN 的力。
- 3) 在接缝上方罩面中的最大应变随着测试循环增加而增加。接缝上方罩面最大应变增加的速率不铺夹层的明显高于用 ISAC 处治者。
- 4) 当使用 ISAC 时，注意到在接缝上方 AC 罩面中最大应变的较小增加，只有在接缝位

移和循环次数增加的情况下才发生。

- 5) 在测试3中, 0.33cm的接缝位移, 120次循环后, 大量的竖丝裂缝在熟石膏中出现, 在接缝两侧大约45cm范围内扩展。靠近接缝的裂纹分布比较远处的裂纹分布密。这些裂缝只有在熟石膏中才可以看到, 而在沥青混凝土材料中却未见到。这说明相比接缝处的较高的应力, 在接缝附近很大范围内应力均匀分布, 在接缝较远处逐渐减小。即使在AC罩面中较高的应变下(测试4和测试5)土工织物仍然与罩面紧密粘结, 裂缝不再进一步发展。只有在罩面表面的较小区域的剥落才显示可能有裂缝形成。这一状况只有在接缝张开位移最大为0.49cm时才明显。

3、伊利诺斯州ISAC路用性能调查综述

表3-4 伊利诺斯州ISAC路用性能调查表

地点	面层厚度 (cm)	方案调查说明	反射裂缝数量		铺设ISAC夹层的加铺层平均接(裂)缝间距(m)
			无ISAC夹层	有ISAC夹层	
IL38 Rochelle, IL	6.3	1994年夏修建, 2000年7月14最后一次调查	20	5	横向7.6
	8.9		18	0	
US 67 Jacksonville, IL	5.7	1998年修建, 2001年4月20最后一次调查	50条/km	3条/1862m	横向27.2
Mattis Avenue, Champaign, IL	7.6	2000年修建, 2001年7月28最后一次调查	21条/1065m	2条/1862m	横向8.3
Dekalb Airport, IL	7.6	1998年夏修建, 2000年8月最后一次调查	无	0	纵向4.6
Willard Airport, Rantoul, IL	15	1999年7月修建, 2001年7月25最后一次调查	4	0	横向7.6
Rantoul Airport, Rantoul, IL	10.2	1999年夏修建, 2001年7月25最后一次调查	0条/27m	0条/132m	横向4.6 纵向3.8

对比表格中调查的数据发现, ISAC复合夹层能够较好控制旧水泥路面加铺层的早期裂缝。

§3.4 ISAC夹层防反射裂缝断裂力学有限元分析

§3.4.1 单一夹层有限元力学分析

为了从理论和力学上分析ISAC复合夹层抵抗反射裂缝(温度荷载和交通荷载)的作用, 本文利用商业通用有限元软件ABAQUS对加铺层进行力学分析。根据分析的需要, 把路面结构简化成平面模型, 用等参八结点四边形单元作为分析的基本有限元单元。对于裂缝尖端的应力集中, 采用奇异单元即四分之一节点单元进行模拟。

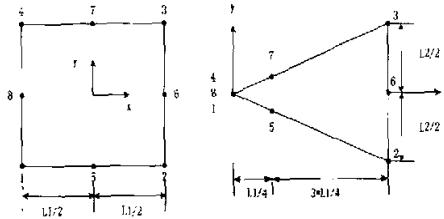


图 3-7 等参单元和四分之一节点奇异单元

为了更好的符合实际，在分析时模型采用如下基本假定：

- 1) 土工布采用薄膜单元，即其垂直方向的刚度很小，不能承受面内垂直荷载、弯矩，只能承受水平方向拉应力，认为其在路面结构中只改变AC层底部水平方向的力学特性。对由荷载引起的剪切型反射裂缝几乎没有效果；
- 2) 沥青加铺层，带有接缝的旧水泥混凝土路面和地基等都为均匀，连续，各向同性的线弹性体；
- 3) 高劲度土工合成材料看作独立的受力层，假定其为线弹性体，而 SAMI 采用薄膜单元来模拟；
- 4) 由于换板没有设置传力杆，不考虑旧板中钢筋传力杆的作用；
- 5) 路表面作用有温度载荷，路面体内温度传导满足热传导定律，同时认为水平向和最下层无限远处应力与位移为零；
- 6) 温度应力分析时，假定路面温度从 60℃下降至 20℃，假定沥青路面整个温度场的计算处于稳态传导，非瞬态传播。

§3.4.2 交通荷载作用下抵抗反射裂缝分析

在无任何特殊说明的情况下，材料参数取值如下：沥青混凝土 $E=1500\text{MPa}$, $\mu=0.25$, 旧水泥混凝土 $E=25000\text{ MPa}$, $\mu=0.20$, $h=0.24\text{m}$, 原水泥混凝土路面基层 $E=1000\text{MPa}$, $\mu=0.25$, $h=0.30\text{m}$, 地基 $E=50\text{MPa}$, $\mu=0.35$, 复合夹层中高强度土工织物 $E=4000\text{MPa}$, $\mu=0.25$, $h=0.02\text{m}$, 低刚度土工薄膜 $E=40\text{MPa}$, $\mu=0.25$, $h=0.02\text{m}$ 。

分析偏荷载作用下，单一夹层抵抗荷载引起的接缝处沥青层底的应力。

表 3-5 偏荷载作用下不同模量夹层的力学计算结果

层厚 cm	夹层模量 MPa	基层模量 MPa	接缝区沥青加铺层的应力 MPa				接缝区路面 表面最大弯沉 mm
			层底纵向 最大应力	层底纵向 最大拉应力	最大 剪应力	最大 主应力	
10	20	700	-0.178	0.073	-0.672	0.473	0.225
	40		-0.178	0.013	-0.616	0.379	0.200
	60		-0.212	-0.011	-0.561	0.323	0.241
	100		-0.247	-0.030	-0.535	0.256	0.215
	2000		-0.309	0.008	-0.334	0.193	0.158
	4000		-0.282	0.021	-0.303	0.201	0.152
	6000		-0.266	0.022	-0.285	0.201	0.148
	8000		-0.256	0.020	-0.273	0.200	0.145

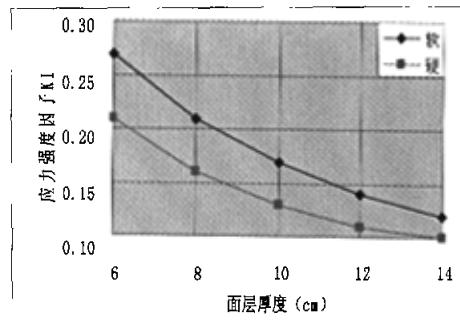


图 3-8 高、低劲度夹层抵抗偏荷载作用示意图

由上述表格数据可以得知：

- 通过横向对比我们发现，在偏荷载作用下，接缝区沥青层底的纵向最大应力基本上都是负数，即使出现一点纵向拉应力，其数值也是很小的。所以我们可以知道最大主应力以及最大剪应力是引起接缝区沥青加铺层反射裂缝的主要原因。
- 通过纵向对比可以得知，高劲度夹层提高了路面的强度，相对于软夹层来说比较明显的降低了沥青层底的剪应力，减小了沥青层底的剪切疲劳破坏，降低了剪切破坏的速率，尤其当沥青层的出现裂缝后，硬夹层可以更有效的降低剪切破坏进一步开裂的速率。
- 通过断裂力学有限元分析认为，当沥青面层本身没有开裂时，高、低劲度夹层的加入均可以较有效的减小裂缝处开裂的趋势，劲度较高的夹层的作用略微明显一些。
- 综上所述，认为高劲度夹层可以更好的改善荷载作用下裂缝处的沥青加铺层底的应力和变形，作为主要的结构受力层。

§3.4.3 温度荷载作用下抵抗反射裂缝分析

为了表明夹层在温度变形作用下，消减接缝处沥青层底开裂的趋势。

定义如下力学模型：

假定沥青加铺层层底有 1cm 长度的预裂缝，旧水泥混凝土板接触处光滑，低劲度土工夹层（土工布）采用薄膜单元，不考虑垂直方向的受力。

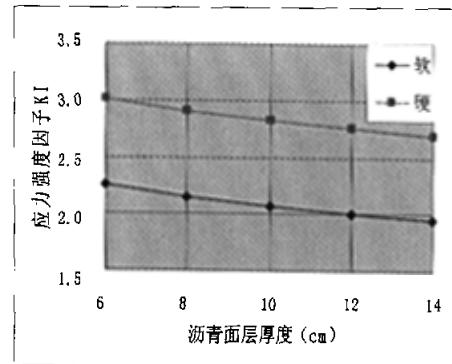


图 3-9 沥青层底裂缝尖端应力强度因子 KI

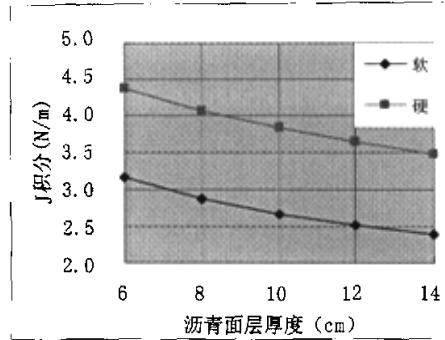


图 3-10 沥青层底裂缝尖端 J 积分

- 1) 面层厚度的增加并不能明显降低沥青层底的温度开裂。
- 2) 当沥青层底产生裂缝时, 温度变化时在旧水泥混凝土路面接缝处引起水平位移, 产生拉应力, 基于应力强度因子 K_I 和 J 积分判断准则可以得知, 大变形率、软弱土工薄膜夹层比硬夹层能够更好的消散温度变形引起的沥青层底的应力集中。

§3.4.4 ISAC 复合夹层断裂力学分析

上述两节论证了 ISAC 复合夹层材料中各自单一夹层的作用机理, 本节就试验路中旧水泥混凝土路面+ISAC 复合夹层+沥青混凝土方案基于断裂力学理论施加偏荷载和温度场分别分析 ISAC 复合夹层特性, 模型定义如本节上述部分。

前面分析得知高劲度土工夹层可以较好的抵抗荷载作用引起的剪切型反射裂缝, 对比分析 ISAC 复合夹层与单一高劲度土工夹层抵抗荷载引起的开裂。

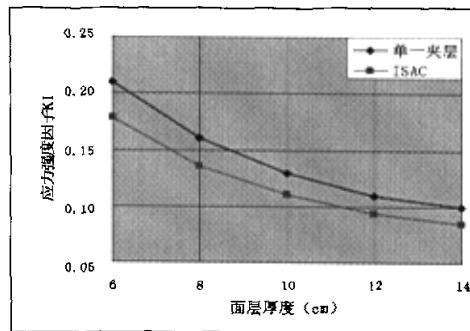


图 3-11 ISAC 复合夹层与单一高劲度土工夹层抗裂效果分析

由图 3-11 显示:

- 1) 随着面层厚度的增加, 沥青层底裂缝间断的应力强度因子 K_I 随加铺层厚度的增加而减小, 当沥青加铺层厚度达到 10cm 后减小的趋势减缓, 认为在旧水泥混凝土路面上铺设 ISAC 夹层后, 其加铺层厚度需要 10cm 左右。
- 2) 的结果显示, ISAC 复合夹层对于消散荷载作用下裂缝尖端的应力集中与单一高劲度土工夹层的效果差不多, 进一步验证了复合夹层结构中主要的受力层为高劲度土工材料。

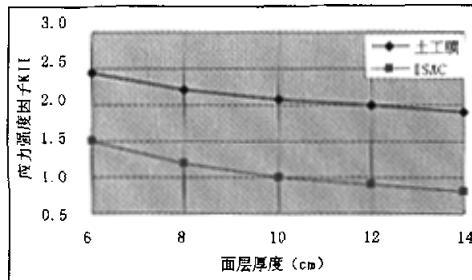


图 3-12 ISAC 复合夹层与单一土工薄膜抵抗温度应力分析

由图 3-12 得知：

- 1) 由于在 ISAC 复合夹层的上部采用了变形率较小的高劲度土工合成材料（如玻纤格栅），其进一步隔离了由裂缝尖端传递至沥青面层的拉应力，明显降低了温度应力作用下沥青层底的张拉型开裂，图形数据显示其抗裂效果明显优于单一土工薄膜夹层。
- 2) 总之，由图 3-12 和图 3-11 得知，ISAC 复合夹层结合了高、低劲度土工合成材料的防裂效果，并形成有效的防水层。

§3.5 本章小结

小变形率、高劲度土工夹层可以较有效的抵抗荷载引起的反射裂缝，而大变形率、低劲度的土工薄膜可以有效的消散由温度应力引起的张拉型反射裂缝，提出 ISAC 应力吸收复合夹层材料来防治反射裂缝，介绍了其在伊利诺斯州的研究与应用，并基于断裂力学-有限元理论，分析了 ISAC 复合夹层的作用机理，主要结论如下：

- 1) 伊利诺斯州的研究表明，复合夹层材料作为加筋防水夹层可以较好的消散旧水泥混凝土路面接缝处加铺层底的应力，并形成有效的防水夹层从而降低接缝处的破坏。
- 2) 基于断裂力学理论初步分析了 ISAC 复合夹层中高、低劲度土工织物的作用机理，认为复合夹层中的高强度土工织物主要作为结构层受力，抵抗荷载引起的变形，而低劲度土工薄膜可以有效的消散温度变化引起的拉应力，并在浸渍粘层油后形成有效的防水层。
- 3) 由于在 ISAC 复合夹层的上部采用了变形率较小的高劲度土工合成材料（如玻纤格栅），其进一步隔离了由裂缝尖端传递至沥青面层的拉应力，明显降低了温度应力作用下沥青层底的张拉型开裂，数据显示其抗裂效果明显优于单一土工薄膜夹层。
- 4) ISAC 复合夹层对于消散荷载作用下裂缝尖端的应力集中与单一高劲度土工夹层的效果差不多，这也进一步验证了复合夹层结构中主要的受力层为高劲度土工材料。
- 5) ISAC 材料层综合吸取了单一土工合成材料防裂的优点，可以消散和减少传递至沥青罩面中的温度应力和荷载，这将提高沥青面层的寿命。
- 6) 使用高强土工织物受重复荷载作用的影响较小。随着温度循环次数的增加，应变只有较小的增加，从而提高了 AC 罩面的使用寿命。
- 7) 国内实践中缺乏 ISAC 与其它目前使用的防止反射裂缝措施的使用性能比较。
- 8) 基于断裂力学-有限元理论分析了 ISAC 复合夹层的力学作用机理，计算认为铺设 ISAC 复合夹层后沥青加铺层仍需要达到 10cm 左右。

第4章 级配碎石加铺层有限元力学分析

级配碎石本身的材料非线性特性使得其作为旧水泥混凝土路面加铺层不传递接缝处的拉应力、拉应变，消散应力集中；同时，作为结构层还可以起到较好的隔离作用，并形成有效的排水层。根据级配碎石材料应力依赖模型的研究，结合级配碎石试验路 FWD 模量检测数据，采用非线性三维有限元程序分析旧水泥混凝土路面上级配碎石加铺层的应力。

§4.1 级配碎石材料应力依赖模型的研究

无粘结粒状材料的回弹反应通常是通过回弹模量和泊松比表现其特性。对于有恒定围压的重复荷载三轴试验，回弹模量和泊松比定义为^[37]：

$$M_R = \frac{\Delta(\sigma_1 - \sigma_3)}{\varepsilon_1} \quad (\text{式 4-1})$$

$$\mu = \frac{\varepsilon_3}{\varepsilon_1} \quad (\text{式 4-2})$$

其中： M_R 为回弹模量； μ 为回弹泊松比； σ_1 为主要主应力或轴向应力； σ_3 为小主应力或侧向应力； ε_1 为主要主应变或轴向应变； ε_3 为小主应变或轴向应变。

对于可变周围应力的重复荷载三轴试验，回弹模量和泊松比的定义为：

$$M_R = \frac{\Delta(\sigma_1 - \sigma_3)\Delta(\sigma_1 + 2\sigma_3)}{\varepsilon_1\Delta(\sigma_1 + \sigma_3) - 2\varepsilon_3\Delta\sigma_3} \quad (\text{式 4-3})$$

$$\mu = \frac{\Delta\sigma_1\varepsilon_3 - \Delta\sigma_3\varepsilon_1}{2\Delta\sigma_3\varepsilon_3 - \varepsilon_1\Delta(\sigma_1 + \sigma_3)} \quad (\text{式 4-4})$$

通过试验数据来模拟非线性依赖于应力的回弹模量模型和泊松比的模型。

1) 围压模型

Seed 等人使用砂和砾石，在饱和及干燥的状态下进行重复荷载三轴试验，结果的表达形式为：

$$M_R = k_1\sigma_3^{k_2} \quad (\text{式 4-5})$$

其中 k_1 和 k_2 为回归常数。他们成功的应用这一模型预测了试验路的弯沉。

2) $k - \theta$ 模型

这一模型中回弹模量依赖于主应力之和。

$$M_R = k_1 \theta^{k_2} \quad (式 4-6)$$

其中: θ 为主应力之和或第一应力不变量 ($\sigma_1 + 2\sigma_3$)。

通常采用这个模型来计算回弹模量, 在道路设计中将应力状态的影响和路层刚度相联系。

表 4-1 国内外试验得出的回归参数 K_1 、 K_2 范围

项目 机构及个人	材料类型	试件 样本数	K_1 (kPa)		K_2	
			范围	平均	范围	平均
Musharraf Zaman	石灰岩	27	5170~17202	11186	0.45~0.40	0.43
John. Allen	石灰岩、碎砾石	54	6938~31056	18997	0.33~0.65	0.49
Gonzalo Rada ¹ Matthew W. Witczak	石灰岩	39	12342~83860	22173	0.23~0.52	0.40
	轧制碎砾石	115	4066~56670	49749	0.16~0.86	0.45
Monismith Witczak	使用中的基层 和底基层材料	-	8230~15237	-	0.46~0.65	-
澳大利亚	典型粒料	-	-	17247	-	0.49
何兆益	石灰岩	12	16939~31925	24432	0.40~0.53	0.47

从表 4-1 可以看出, 即使对于相同石质的级配碎石, K_1 和 K_2 的变化范围都有较大的区别, 其中 K_1 变化范围大而 K_2 变化范围较小。研究表明, 级配碎石非线性参数与含水量、密实度、级配、材料类型等材料特性有关^[6]。

根据以往的材料特性研究, 计算中级配碎石材料应力依赖模型简化为:

$$E = 24432\theta^{0.47} \quad (式 4-7)$$

§4.2 级配碎石材料特性三轴试验研究

对无粘结材料进行试验的目的是将具有代表性的道路材料试样在十分接近实际现场的模拟环境(包括模拟的交通荷载和周围的环境)下进行测试。因此实验室的仪器应该可以通过施加荷载以模拟交通状况。对于道路交通, 这可能需要比较复杂的仪器。然而, 实验室测试的仪器必须简单可重复使用, 这样就可以很快得到所需的材料参数。

由于动三轴试验能同时模拟级配碎石三向受压这一复杂应力状态及反复动载作用, 因而室内重复动三轴试验是研究级配碎石基层回弹模量最为有效的方法。通过试验得到的数据可用来建立适当的模型以模拟粒状材料在荷载作用下的特性。

级配碎石弹性模量随应力而变化的非线性特性表明, 处于不同应力状态下级配碎石的弹性模量是不同的, 其变化往往较大。作为上基层的级配碎石, 由于其下卧混凝土板刚度大, 故碎石上基层处于三向受压状态, 而动三轴试验则能较好的模拟这一受力状态。国内外的研究表明, 应力状态是影响级配碎石回弹模量的主要因素。除此之外, 材料类型、级配、含水

量、密实度、试验方法等因素对回弹模量也有不同程度的影响。表4-2为试验的材料在低应力(围压40KPa, 偏应力30KPa), 中间应力(围压100KPa, 偏应力70KPa)以及高应力(围压120KPa, 偏应力130KPa)下使用 $k-\theta$ 模型计算得到级配碎石材料回弹模量值^[37]。

表4-2 不同三轴试验下模量计算值

结构层	最小主压应力 σ_3 (KPa)	最大主压应力 σ_1 (KPa)	应力不变量 θ ($\sigma_1 + 2\sigma_3$) (KPa)	回弹模量E (MPa)
级配碎石 上基层 ¹	20—120	120—500	250—700	300—500

§4.3 旧水泥路面级配碎石加铺层非线性有限元力学分析

假定路面结构:沥青面层+15cm 级配碎石+24cm PCC 水泥混凝土板+18cm 基层+15cm 底基层+土基

材料参数:如无特殊说明,模型中的PCC板厚 $h=24\text{cm}$,模量 $E=25000\text{MPa}$,泊松比 $\mu=0.20$;路面基层厚度 $h=18\text{cm}$, $E=1500\text{MPa}$, $\mu=0.25$;底基层厚度 $h=15\text{cm}$, $E=600\text{MPa}$, $\mu=0.25$;土基 $E=50\text{MPa}$, $\mu=0.35$,级配碎石 $h=15\text{cm}$, $\mu=0.35$;胎压 $=0.7\text{MPa}$,荷载采用上述简化模型。

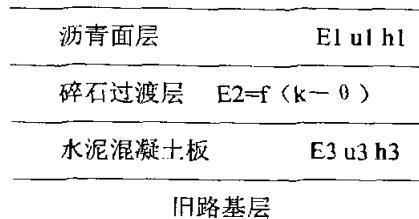


图4-1 级配碎石结构力学分析示意图

分析中假定级配碎石材料的采用三维有限元程序分析级配碎石沥青加铺层的应力。

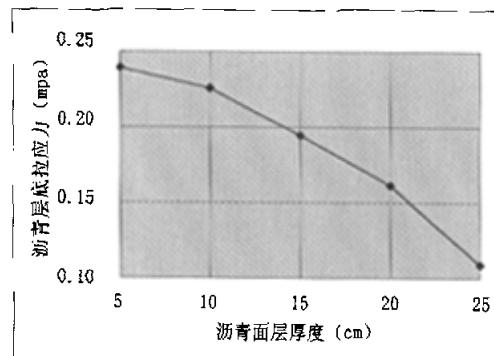


图4-2 不同厚度沥青层底拉应力

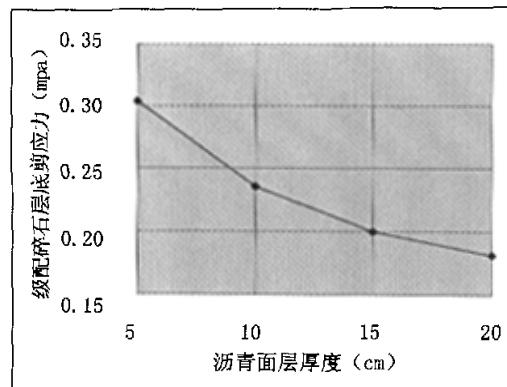


图 4-3 不同沥青面层厚度级配碎石层底剪应力

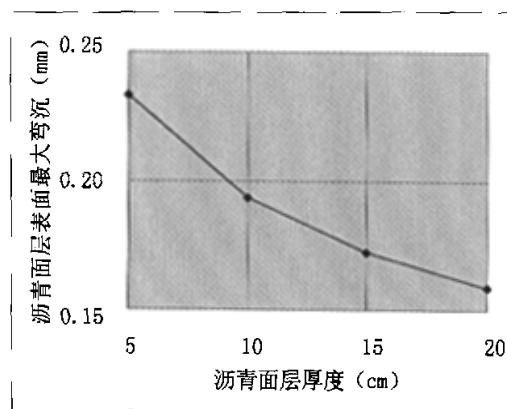


图 4-4 不同厚度沥青面层最大弯沉

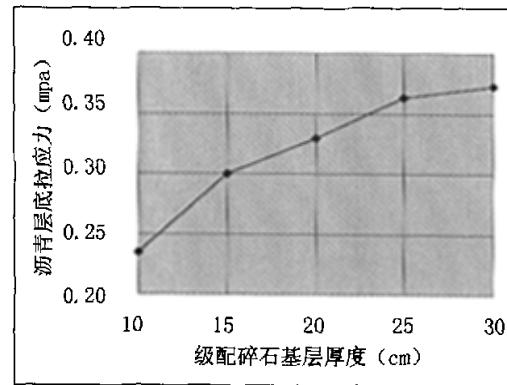


图 4-5 不同厚度级配碎石基层沥青层底拉应力

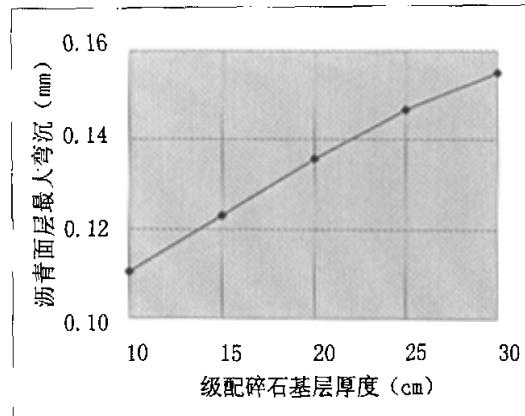


图 4-6 不同级配碎石基层厚度沥青路面最大弯沉

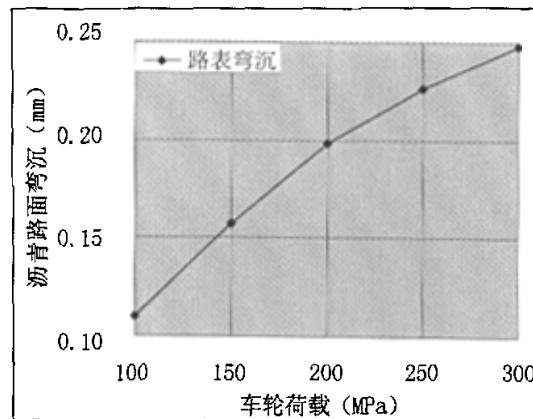


图 4-7 不同荷载作用下路面弯沉响应

对比上述图表可以得知：

- 1) 由图 4-2 可以看出, 当级配碎石基层厚度为 20cm 时, 随着沥青面层厚度的增加, 沥青层底的拉应力下降, 一方面是由于厚度的增加起到了消散应力的作用, 同时减轻了旧水泥混凝土路面接缝处的变形, 其应力值在 0.2MPa 左右。通常取 10~15cm 厚沥青加铺层。
- 2) 由图 4-3 得知, 随着沥青面层厚度的增加, 级配碎石层底的剪应力逐渐减小, 当面层厚度增加到 10~15cm 以上时, 级配碎石层底的剪应力下降趋势变缓, 这也从侧面验证了合适的沥青加铺层厚度为 10~15cm。此时, 级配碎石基层底部的剪应力为 0.2~0.25MPa。
- 3) 由图 4-4 得知, 随着沥青面层厚度的增加, 面层表面的最大弯沉呈下降趋势, 当面层厚度大于 25cm 时, 下降趋势减缓, 其弯沉值为 0.15mm 左右。
- 4) 由图 4-5 得知, 随着级配碎石厚度的增加, 沥青层底的拉应力逐渐变大, 这是由于较低强度的级配碎石层厚度的增加降低了路面的整体强度, 因而其厚度不宜过大, 当级配碎石厚度介于 15~20cm 时, 其增加趋势最小, 当厚度超过 20cm 时, 继续最大, 后又逐渐减小, 因而级配碎石基层合理的厚度为 15~20cm。
- 5) 由图 4-7 可以得知路面表面的弯沉随荷载的增加逐渐变化趋缓, 认为这可能是由于

级配碎石在重载作用下的应力硬化特性导致。

§4.4 级配碎石加铺层结构设计研究

研究表明,刚性水泥板上碎石基层沥青路面结构中由于受力状态的因素,碎石层的非线性特性比土基更为重要,严格反映这种碎石基层结构中不同位置弹性模量变化的相应分析,借助非线性有限元法是比较理性的,尽管如此,非线性有限元分析用于路面设计仍然有许多不便之处^[36]。

事实上,对于一定的路面结构,级配碎石基层所受应力状态总是在一定有限范围内。按照这一应力范围,根据级配碎石弹性模量依赖应力状态而变化的非线性模型,完全可以确定一个用于弹性层状理论分析的碎石基层模量。此时实际上已反映了碎石基层的非线性,但用于设计其计算方法却比非线性有限元更简单。

认为这种在设计方法上仍以弹性层状理论为主,但在参数测试和取值上充分考虑材料非线性的思路仍是可行。

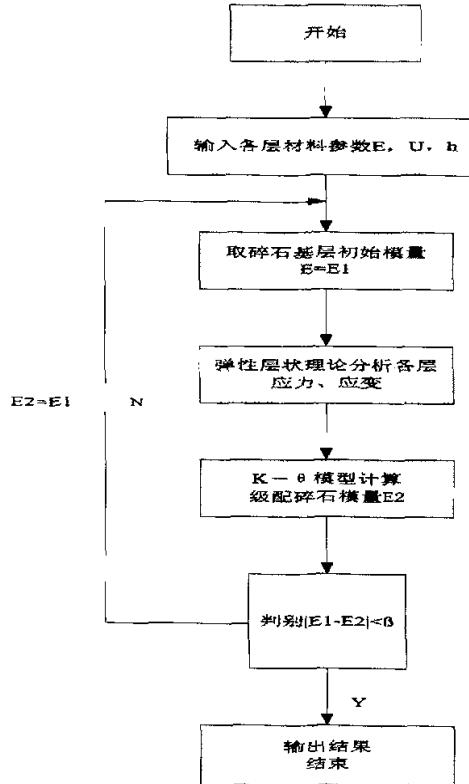


图 4-8 旧水泥混凝土路面级配碎石加铺层结构设计思路流程图

§4.5 本章小结

通过旧水泥混凝土路面级配碎石加铺层的力学分析,得到如下结论:

- 1) 当级配碎石基层厚度为 20cm 时,随着沥青面层厚度的增加,沥青层底的拉应力下

降趋势加快, 其应力值在 0.2MPa 左右。另外, 过厚的加铺层也是不经济的, 通常取 10~15cm 厚沥青加铺层。

- 2) 随着沥青面层厚度的增加, 级配碎石层底的剪应力逐渐减小, 当面层厚度增加到 10~15cm 以上时, 级配碎石层底的剪应力下降趋势变缓, 这也从侧面验证了合适的沥青加铺层厚度为 10~15cm。此时, 级配碎石基层底部的剪应力为 0.2~0.25MPa。
- 3) 随着沥青面层厚度的增加, 面层表面的最大弯沉呈下降趋势, 当面层厚度大于 15cm 时, 下降趋势减缓, 其弯沉值为 0.15mm 左右。
- 4) 随着级配碎石厚度的增加, 沥青层底的拉应力逐渐变大, 这是由于较低强度的级配碎石层厚度的增加降低了路面的整体强度, 因而其厚度不宜过大, 当级配碎石厚度介于 15~20cm 时, 其增加趋势最小, 当厚度超过 20cm 时, 继续增大, 后又逐渐减小, 因而级配碎石基层合理的厚度为 15~20cm。
- 5) 旧水泥混凝土板上级配碎石加铺层在重载的作用下, 表现出应力硬化的特性。

第5章 试验路工程实例

§5.1 试验路工程概况及维修方案

国道322线桂林至全州段(k228~k344.72)一级公路全长125.12km,其中全州段49.44km,兴安段48.00km,灵川段27.68km,于1992年至1996年先后分段完工交付使用。近几年来交通量迅速增长,超载车辆多,加上原设计的基层为级配碎石、砂砾、风化碎石,路面出现了严重破碎、沉陷、错台、唧泥等严重病害,严重影响行车安全。

由于种种原因,目前路面损坏非常严重(表5-1、表5-2),路面病害发展速度惊人,部分路段病害严重影响行车安全,社会影响不良。主要病害有:水凝混凝土板严重破碎、沉陷,横缝严重错台,板角断裂、严重裂缝(崩缝)、板底严重脱空等,此外还有局部路表露石、接缝破损等。

表5-1 全桂路错台检测结果

县段	路段	错台5mm以上板块	错台5~9mm板块	错台10mm以上板块
全州	K264~K265	17%	11.5%	5.5%
	K266~K267	14.5%	11.5%	4%
	K275~K276	14.9%	10.1%	4.8%
兴安	K312~K313	6%		
	K314~K315	8.5%		
	K318~K319	5.5%		
灵川	K327~K328	14%		
	K329~K330	9.4%		
	K331~K332	15.6%		

表5-2 全桂路平整度检测结果表

县段	路段	间隙大于5mm的百分比	间隙大于8mm的百分比
全州	K264~K265	33%	3.7%
	K266~K267	34.8%	2.6%
	K275~K276	34%	6.7%
灵川	K327~K328	43%	6.5%
	K329~K330	49%	13.5%
	K331~K332	36%	17%

表5-3 全桂路断板率检测结果

管养单位	全州	灵川	兴安
桩号	K236~K270	K273~K318	K325~K336
平均断板率	8.5%	20.7%	6.7%

本工程采用如下维修流程:

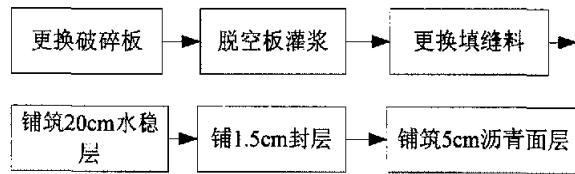


图 5-1 全桂路主体工程维修方案流程

挖除破碎砼板及松散基层, 铺筑 15cm 厚 C15 砼基层 (替换基层) + 24cm 厚 C35 砼面层。施工时应注意以下几个要点:

- 1) 铺筑 C15 砼基层前应用压路机或震动夯锤压实砂砾或碎石底基层;
- 2) C15 砼基层表面应抹光滑, 并应锯缝后灌注沥青, 该锯缝与砼面层缩缝 (锯缝) 错开的距离应不于 50cm;
- 3) 砼面层铺筑前应在 C15 砼基层上涂抹脱模剂或塑料薄膜;
- 4) 更换破碎砼板后, 必须先将与该板相临的旧砼板底灌浆稳板, 然后方能开放交通。因为, 挖除破碎砼板和其基层时, 不可避免地挖去与其相临砼板的基层, 造成板下脱空, 如不灌浆稳板, 开放交通后必将导致该砼板断裂;
- 5) 挖除的砼断块应充分利用, 以免污染环境, 若其轧制的碎石用于砼, 应进行原材料试验和砼配合比试验, 并应满足规范要求。

灌浆工艺的研究见下节介绍。

§5.2 试验段设计

§5.2.1 试验段破损状况调查与评价

1、验路段的前期处理

由于旧水泥混凝土路面破损严重, 对断裂较严重的混凝土板进行全幅更换。混凝土板底灌浆稳板, 更换旧路面填缝料, 更换破碎混凝土板的路面结构为 24cm 35# 水泥混凝土面层 + 15cm 厚 15# 素混凝土基层。

§5.2.2 试验段结构组合设计

- a) 方案一: 4cm SBS 改性沥青混凝土 AC-16I + 5cm AC-20I 沥青混凝土 + 1.5cm 下封层 + 15cm 级配碎石 + 旧混凝土路面 (白 + 缓冲层 + 黑);
- b) 方案二: 4cm SBS 改性沥青混凝土 AC-16I + 5cm 沥青混凝土 AC-20I + ISAC 复合夹层 + 旧混凝土路面 (白 + ISAC + 黑);
- c) 方案三: 5cm 沥青混凝土 AC-16I + ISAC 复合夹层 + 24cm 分离式混凝土板 + 1.5cm 下封层 + 旧混凝土路面 (白 + 白 + ISAC + 黑);
- d) 方案四: 26cm 分离式混凝土 (缩缝设传力杆) + 1.5cm 沥青砂调平层 + 旧水泥混凝土路面 (白 + 白)。

§5.3 试验段施工控制

§5.3.1 脱空水泥混凝土板处治

对于试验段的破损板主要采用35#水泥混凝土板替换，当基层破损较严重时，采用C15素混凝土进行基层补强。国内进行旧水泥混凝土路面加铺改造工程之前，一般都采用压浆工艺进行脱空板处治。

旧水泥混凝土板脱空的确定方法主要有：

- 1) 重型车辆通行时人在板的边缘感觉有垂直位移和翘动的板块；
- 2) 板角相邻两条缝填缝材料严重剥落；
- 3) 相邻板间出现错台3mm以上时，位置较低的板块一般有脱空的存在；
- 4) 对于外观不易判断的板块，测它4个边角的弯沉，弯沉值超过0.36mm的板；
- 5) 利用FWD在板边分4次加载，以荷载为纵坐标，弯沉值为横坐标作图，其弯沉值连接线在横坐标上有截距存在时，可判定为脱空；
- 6) 规范规定凡角点弯沉大于0.2mm即判定为脱空。

试验路脱空评定主要采用FWD逐板检测的方法来评定，而全线主体工程还是采用弯沉车检测评定。下面主要介绍旧水泥混凝土板底压浆工艺的总结和体会。

1、水泥的选择^[36]

砼板底压浆是利用压浆泵的压力推动，将拌和良好的板底填充材料沿管壁、压头挤入板底。挤入板底的填充材料经硬化后形成一薄层结构密实、水稳定性优良、与砼板底密贴的结构层。要求在压浆过程中不离析、不泌水，必须注重压浆原材料的选择。

1.1 原材料选择

胶凝材料水泥的选择：要保证压浆材料经压浆泵和各种管道顺利地压入板底，则要求压浆拌和物具有良好的可泵性、保水性。硅酸盐水泥和普通硅酸盐水泥常被优先用作压浆拌和物中的胶凝材料。

1.2 掺和中介材料粉煤灰的选择

实践证明，砼板底脱空除在板角、板缝、板边深度较大外，其它部分大多在1~2mm之间，因而碎石不宜作为砼板底脱空的处治材料；砂的主要成分为二氧化硅，其硬度较高，对泵送设备与管路磨损较大，且砂仅能作为掺和材料，而起不到中介作用；而粉煤灰却是处治砼板下脱空的较为理想的材料，除了粉煤灰能与水泥的水化产物进行二次水化反应，使硬化结构物更致密，强度更高，收缩率小外，其优良的颗粒外形与组成非常适宜压浆处治。

粉煤灰在一般砼工程使用中，大都要求对其磨细再加工，但在砼板底压浆处治中，要求必须使用原状灰，其原因是粉煤灰磨得太细，机械磨损大，能源消耗高，掺和使用时粉尘污染严重，同时也给成品灰的包装运输带来困难。除此之外，更重要的原因之一是原状灰的平均粒径较粗，其颗粒组成在砂子的筛分曲线范围之内，有利于形成结构致密的填充层，而原状灰中颗粒较细部分，活性较大，可提高填充物的强度与密实度。原因之一二是原状灰中含有大量球状玻璃体，如进行机械加工处理则球状玻璃体将遭破坏，前述的中介效能也丧失殆尽。原状粉煤灰在使用前应过筛，筛除大于5mm的颗粒和石子及其它杂物（如铁钉、草木等），以防堵塞管路。

1.3 膨胀剂的选择砼

板下脱空压浆，是为了恢复砼板与基层的密贴，从而形成均匀支承。但由于水泥粉煤灰浆硬化后，因材料特性原因，存在着4%的结构收缩，同时因温度的升降结构还要产生0.1%的膨胀与收缩，因而如不采取措施，要砼板底经压浆处理后达到密贴的要求是不可能的。板底一旦不密贴，将会对砼板的使用产生很大的隐患，其隐患不在于强度方面，而在于渗透

方面,因砼板底经压浆处治后,虽然压浆材料所形成的填充层的水稳定性较高,也很密实,能防止渗入水向基层渗透,但由于砼板底填充物不是到达砼板底的全部表面,而是仅占据脱空区,因而板底填充物在板下没有形成连续的表面,渗入水就会沿原水稳定性、防渗性不好的基层下渗与扩展。砼板底脱空处治时,必须采取防收缩措施,以防渗入水继续下渗与蔓延。在水粉煤灰浆中掺入膨胀剂就是一种好办法。

2、板底脱空压浆材料配合比选择

水泥粉煤灰作为砼板底脱空的处治材料,因水泥用量较大,粉煤灰又具有一定的活性,故达到3MPa的抗压强度是有把握的,问题的关键是水泥粉煤灰浆要具有良好的可塑性、粘聚性和保水性,所以材料配合比选择要慎重。参考有关资料和实验室的试验结果,配合比采用:水泥:粉煤灰:膨胀剂:早强剂:水=1:2(3):0.08:0.06(0.12):1.2(1.65)。

3、砼板底脱空压浆处治工艺流程

整个压浆工艺包括钻孔定位、钻孔、装卡、压浆、卸卡、移位6道工序。

4、施工质量控制要点

4.1、注重施工管理,严把压浆材料的质量关和材料配比关各种材料称量,拌和时间要准确,不应出现过拌或欠拌。

4.2、钻孔定位

- 1) 每块完好砼板应钻5个孔,能满足注浆、排气、排渣作用。
- 2) 钻孔位置距板自由边缘和裂缝不得大于30cm。
- 3) 钻孔定位很重要,要不断总结经验,力争孔位在脱空深度最大处。

4.3、压浆

- 1) 压浆若发现灰浆已从压过或未压过的孔溢出时,应及时用木塞塞紧,10min后拔出木塞,且此孔无须再进行压浆。
- 2) 压浆机压力达1.5MPa,或水泥灰浆从其它孔溢出或从边缘、裂缝等处溢出时,将自动停机或人工停机,视为压满。
- 3) 搅拌机、储浆筒内的存料数量不宜过多,应相互协调好。储料筒内的灰浆一旦出现离析应停止压浆并查找原因,解决后才能继续压浆。

4.4、压浆质量检测方法

- 1) 强度检测。每工作日须制作灰浆试块3块,采用三联带底砂浆试模,试块7d(正常养护6d,饱水1d)抗压强度不得低于3MPa,否则为不合格。
- 2) 目测。压浆硬化14d后,用载重汽车(载货8t以上)或钢轮压路机(15t以上)在砼面板上慢速行驶,专人随行目测,观察混凝土板是否有晃动。
- 3) 弯沉检测。以规范推荐的值20为控制指标,检测不合格的砼板应补压浆。

5、总结

通过对全桂路旧水泥混凝土路面脱空处治底研究,提出的上述处治方案处理之后,利用弯沉仪进行检测,发现当时的检测结果令人满意。在整个施工过程中发现有些板被压裂,拱起,说明压浆控制指标的合理性有待进一步研究。

§5.3.2 压浆工艺的探讨

通常,对于旧水泥混凝土路面加铺改造工程,需要对脱空板进行压浆补强,国内外一直对压浆技术的应用褒贬不一。由于本篇论文的依托工程全长125km,单幅施工,使得另一半幅水泥混凝土板在压浆后依然要经受行车荷载的作用。规范规定当弯沉值大于20单位时,需要压浆。众所周知,在压浆过后,如果单独检测弯沉值,其结果通常都是令人满意的。尽管压浆是为了消除板底的脱空,减轻其不均匀支撑和错台,但是在实践中我们发现很多水泥板在压浆时就产生了细微的裂纹,有的被顶起,反而是加剧了板底的应力集中。另外对于某

些脱空较严重的板，由于基层破损，即使进行压浆，通车一段时间后，依然出现较严重的断板病害。因而，对于规范规定的 20 这个数量值不免有其局限性^[37]。

经过将全线各标段原来不同脱空程度的板（板未断裂）分类，灌浆通车近两个月后，在进行罩面之前再次测量各自的弯沉值，检查断板率，验证压浆效果。

表 5-4 压浆效果评定表

脱空程度	弯沉检测值						
	20~30	30~40	40~50	50~60	60~80	80~100	100~120
原来弯沉检测值 0.01mm							
第一次灌浆后 合格板块数(<20)	785	1034	986	638	426	322	268
通车近两月后 脱空板数量	35	56	66	84	77	72	82
脱空率	4.45%	5.42%	6.69%	13.17%	18.08%	22.36%	30.60%
新断裂板块数量	16	31	42	55	62	64	73
断板率	2.04%	3.0%	4.26%	8.62%	14.55%	19.88%	27.23%

通过对比上述表格中的数据汇总，认为在旧水泥混凝土路面大修改造之前，进行旧板的修复是必要的，但是不能总以同一种压浆工艺对待脱空板，对于某些脱空较严重的板，只进行压浆不能彻底的解决板下基层松散引起的病害。在整个大修改造工程中我们发现，对于某些断裂破坏较严重的板，进行换板后如果没有对基层进行补强，发现在通车一阵后新板出现断裂，证明对于破坏较严重，脱空较严重的旧水泥板，只进行板底压浆是不够的。并且压浆材料以及压浆工艺也有待进一步的研究。

根据上述表格中对不同脱空程度板灌浆通车后的脱空检测，当弯沉检测大于 50 单位时，对板底灌浆并不能有效改善板的受力，甚至出现负面作用，引起板的断裂。

建议对于弯沉检测连续 3 块以上大于 50 的水泥板采取破碎移除，修复基层后再加铺新板，或直接利用碎石化技术将旧板砸碎，作为粒料底基层。

§5.3.3 试验路 ISAC 复合夹层及钢筋传力杆施工工艺

ISAC 复合夹层施工工艺：清理基础路面→修补裂缝及接缝（旧路面）→喷洒沥青粘层→自动铺设土工布（满幅）→铺设自粘式玻纤格栅（贴缝铺设）→铺设沥青混凝土→碾压成型



图 5-2 试验路 ISAC 复合夹层土工布自动摊铺图

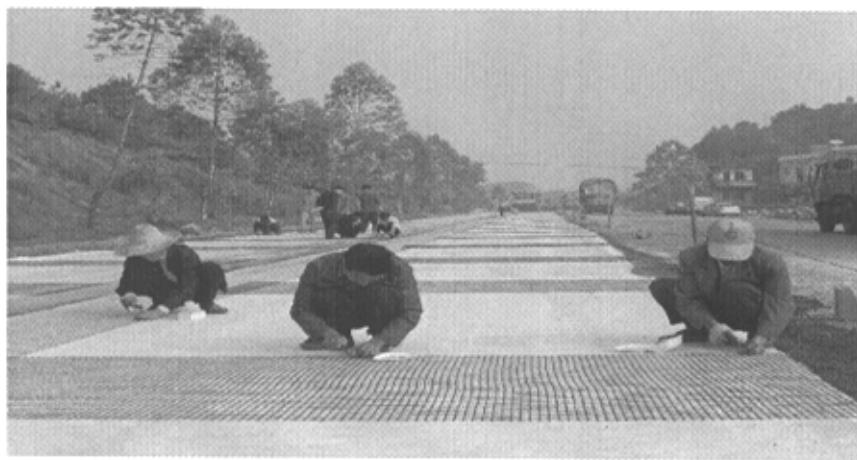


图 5-3 试验路 ISAC 复合夹层自粘式玻纤格栅施工

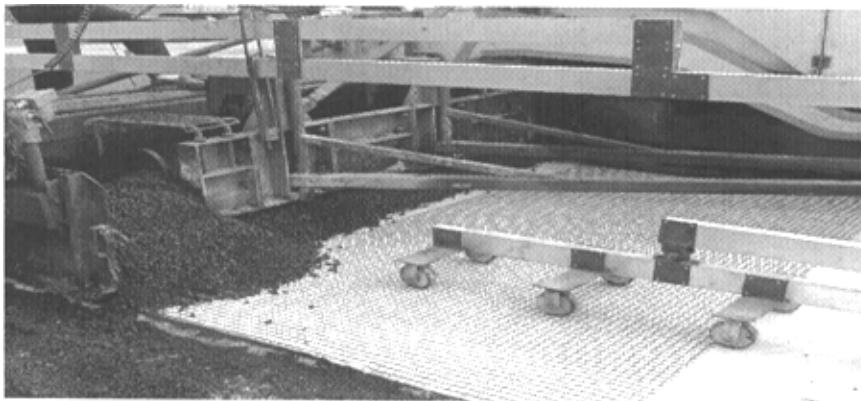


图 5-4 试验路 ISAC 复合夹层沥青面层摊铺

注意：需要按照下列工艺流程进行试铺。

- 1) 材料要求：土工布系采用湖南益阳核工业无纺布厂的银山牌聚酯（涤纶）长丝土工布，单位重 $160\text{g}/\text{m}^2$ ，铺缝宽 1.5 米。同样不得用乳化沥青作粘层油，必须用热沥青。玻纤格栅采用自粘式格栅。
- 2) 准备工作：首先将路面上尖锐的部分予以铲除，对于路面严重裂缝、破碎处，应铲除其破碎部分，并用水泥混凝土或沥青混凝土找平，对局部的坑洞和路面严重不平（如凹处）应找平。对于板底脱空、接缝两侧的相对位移大于 0.10mm 时，施工前应采取灌浆或其他处治措施，工艺应满足相应的技术要求。
- 3) 裂缝或接缝处理：对于路面的裂缝和预制接缝应进行处理。用高压空气（如鼓风机）或高压水将裂缝或接缝内杂物清除干净，用沥青、沥青胶浆（沥青马蹄脂）、填缝料等填充裂缝或接缝。
- 4) 施工时混凝土路面和土工布必须保持清洁和干燥，以增加粘结效果，土工布施工温度要大于 10°C 。
- 5) 采用洒布车洒布粘层油。根据设计要求，粘层油的总用量为 $0.8\text{--}1.2\text{kg}/\text{m}^2$ 左右，粘层油要采用热沥青，一次均匀洒布热沥青，温度控制在 $120\text{--}160^\circ\text{C}$ 即可。由专用土工布摊铺机满幅摊铺，喷洒沥青的横向范围要比无纺土工布宽 $5\text{--}10\text{cm}$ ，以沥青浸渍土工布为度，特别注意要消除不均匀的油堆。整个摊铺过程由进口摊铺机一次摊铺碾平，无需人工作业，效果较好，不容易褶皱，建议采用自动摊铺机作业。
- 6) 土工布铺平后，采用轮胎式压路机进行滚动碾压，使沥青上泛浸渍土工布。
- 7) 铺设玻璃纤维格栅：贴缝铺设 1m 宽的自粘式玻纤格栅，同样张拉摊铺玻纤格栅，使得纵向接头搭接距离不小于 20cm ，横向搭接距离不小于 15cm 。
- 8) 固定玻纤格栅后，必须要轻型钢轮压路机进行适度碾压，不能用锤子直接敲击玻纤格栅。
- 9) 最后加铺沥青混凝土面层，沥青混凝土面层的施工按正常规范规定施工即可。

由于广西地区多是三辊轴摊铺机，滑模摊铺机还没有大规模采用，因而在传力杆布设时，考虑到实际的施工状况，设计了如图 5-5 所示的钢筋支架：

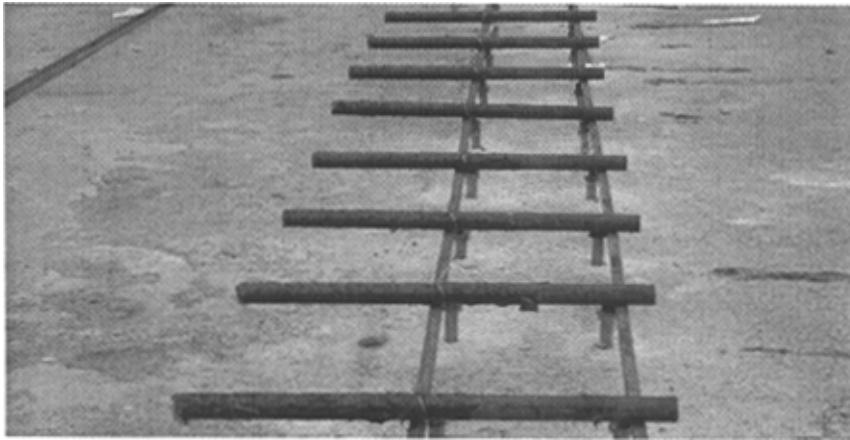


图 5-5 试验路三辊轴施工钢筋传力杆支架布设示意图

§5.4 试验路方案经济分析

路面性能的评价是寿命周期费用分析框架中至关重要的一步。预测剩余寿命或路面破坏水平使得工程师, 和高速公路机构提前作出养护和维修的行为, 对将来的费用进行预算, 并确定维修方案的时间。由于有了充足的时间去规划, 国家交通机构能够通过减小这类修建工程对交通和其它方面的影响使其成本最小。

综合的寿命周期费用分析方法(简称LCCA)的建立需要在工程计划阶段考虑路面设计和整个路面寿命内的性能。包括的组成部分为:

- 路面性能和破坏, 包括新建和改建路面
- 建筑, 养护和改造的费用
- 行车时间延误
- 车辆运营费用
- 排放 (emission)
- 事故
- 当前的折现费用
- 可靠度

目前使用的刚性路面LCCA评价方法的弱点是性能模型的使用, 其不能准确预测路面随时间的破坏。对于各种加铺层的性能模型更没有多少研究, 没有统一的评判指标。

因而本节只能通过简单的材料经济指标来比较各方案的经济合理性。

所取材料单价以广西全桂路改造工程各项目部预算汇总表所列单价为依据:

试验路材料单价一览表(材料层没有做说明的均为厚度为1cm, 贴缝铺设复合夹层宽为1m)

整个试验路结构以单向双车道为例, 宽度为8米,

表5-5 各项目部加铺层材料单价预算汇总表

材料名称	级配碎石	粘层	封层	沥青砂调平层	普通沥青砼	改性沥青砼	35#水泥混凝土
单价(元/m ²)	0.8	1.6	5	7.9	6.3	8.6	2.3

注: 上述材料单价均位材料层每cm厚的单位造价。

表5-6 土工合成材料及钢筋单价汇总表

材料名称	浸渍沥青 烧毛土工布	普通涤纶土工布	玻纤格栅	钢筋
单价	12元/m ²	4元/m ²	13元/m ²	3000元/吨

计算得全线部分试验段各加铺层方案的造价。以单幅两车道8米宽计

方案一: 4cmSBS 改性沥青混凝土 AC-16I+5cm 沥青混凝土 AC-20I+1.5cm 下封层+15cm 级配碎石+旧混凝土路面; (白+级配碎石+黑)

$8 \times (15 \times 0.8 + 1.5 \times 5 + 5 \times 6.3 + 4 \times 8.6) \times 1000 = 683200$ 元/千米; (两车道)

单价: $15 \times 0.8 + 1.5 \times 5 + 5 \times 6.3 + 4 \times 8.6 = 85.4$ 元/平米

方案二: 4cmSBS 改性沥青混凝土 AC-16I+5cm 沥青混凝土 AC-20I+土工布(满铺)+1.5cm 下封层+15cm 级配碎石+旧混凝土路面; (白+级配碎石+土工布+黑)

$8 \times (15 \times 0.8 + 1.5 \times 5 + 5 \times 6.3 + 4 \times 8.6 + 12) \times 1000 = 779200$ 元/千米

单价: $15 \times 0.8 + 1.5 \times 5 + 5 \times 6.3 + 4 \times 8.6 + 12 = 97.4$ 元/平米

方案三: 4cmSBS 改性沥青混凝土 AC-16I + 5cm 沥青混凝土 AC-20I + ISAC 复合土工布(缝铺) + 1.5cm 沥青砂调平层 + 粘层 + 旧混凝土路面; (白+复合夹层+黑)

$8 \times (1.6 + 1.5 \times 5 + 5 \times 6.3 + 4 \times 8.6) \times 1000 + 2 \times 12 \times (8 \times 0.5 + 2.5) \times 1000 / 5 = 631200$ 元/千米

单价: $631200 / (8 \times 1000) = 78.9$ 元/平米

方案四: 26cm 分离式水泥混凝土板 (设缩缝传力杆) + 1.5cm 沥青下封层 + 旧混凝土路面。 (白+白+传力杆)

$8 \times (26 \times 2.3 + 1.5 \times 5) \times 1000 + 60000 = 598400$ 元/千米

单价: $598400 / 8000 = 74.8$ 元/平米

方案五: 5cm 沥青混凝土 AC-16I + ISAC 复合土工布 (缝铺) + 20cm 分离式水泥混凝土板 (设缩缝传力杆) + 1.5cm 沥青下封层 + 旧混凝土路面。 (白+白+黑)

$8 \times (5 \times 6.3 + 20 \times 2.3 + 1.5 \times 5) \times 1000 + 2 \times 12 \times (8 \times 0.5 + 2.5) \times 1000 / 5 + 60000 = 771200$ 元/千米

单价: $771200 / (8 \times 1000) = 96.4$ 元/平米

方案六: 5cm 沥青混凝土 AC-16I + 1.5cm 下封层 + 20cm 水泥稳定碎石基层 + 旧混凝土路面 (白+水泥稳定碎石+黑)

$8 \times (5 \times 6.3 + 20 \times 1.2 + 1.5 \times 5) \times 1000 = 504000$ 元/千米

单价: $5 \times 6.3 + 20 \times 1.2 + 1.5 \times 5 = 63$ 元/平米

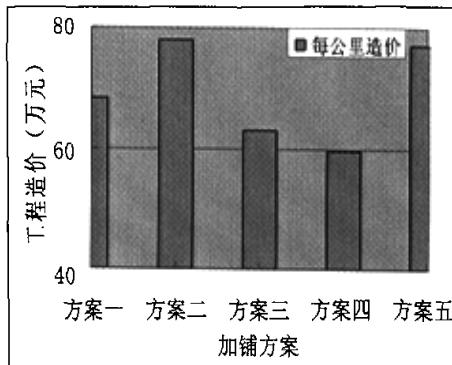


图 5-6 试验路各加铺层造价图

通过全桂路上述方案的经济指标分析我们可以看到:

方案四, 即经过 26cm 混凝土 (设钢筋传力杆) 补强的方案有较好的经济性。另外, 经过板补强后再加铺一薄沥青混凝土罩面可以有效改善路面的行驶质量, 并可以作为防水层, 减轻接缝处的水损坏。

从路面结构力学性能分析和经济性能综合评价可以认为, 在广西这样水泥资源发达, 价格低廉的地区, 在旧水泥混凝土路面上加铺水泥混凝土板面层有较好的应用前景, 同时可以在其上再加铺一薄沥青面层以改善行使性能。

§5.5 试验路 FWD 评价

在试验路加铺使用期间, 利用 FWD 对加铺层进行结构评定, 分别就试验路各结构层检测结果进行分析:

1. 旧水泥混凝土路面十分离式水泥混凝土板（白+白）

前面的分析可以得知，新水泥混凝土板对旧水泥板进行补强后可以明显的减轻脱空、断裂等病害引起的加铺层的破坏，明显的减轻了路面的不均匀支撑，同时，钢筋传力杆的加入使得路面的整体结构性增强，同样降低了路面在脱空等病害下的不利应力，提高了路面的使用寿命。

利用 FWD 对加铺前旧水泥混凝土路面逐块进行检测，对中错缝铺设新水泥板后进行 FWD 的再次检测。200m 新板补强试验路加铺前后检测数据结果汇总如下：

I. 旧路面状况检测汇总

- 1) 旧路面状况：路基基础为填方路段路面状况：检测时，该段路况为水泥面板灌浆后，面层没做任何处理，路基基础为挖方路段。
- 2) 路面传荷能力：总共检查 40 块板，荷能力达到 80% 以上只有 2.5% 板块，路段传荷能力存在明显不足。
- 3) 板底脱空检测：底板脱空比较严重，约有 62.5% 的面板存在不同程度的脱空，脱空范围介于 0.1~2.5 米（距接缝或板角的距离）。
- 4) 面板质量：面板反算模量最大值为 34466.9 MPa，均方差为 7279.2 MPa，变异系数为 42.3%，最小值为 3916.4 MPa，大于 32000 MPa 的板块约占 5.0%。因此，该段路面面板质量有普遍的缺陷。
- 5) 基层：基层顶面当量回弹模量平均值为 178.5 MPa，最小值为 112.8 MPa，最大值为 230.9 MPa，变异系数为 16.0%，按取代表值评定方法反计算，基层顶面回弹模量应大于 236 MPa，所以该路段基层质量有所欠缺。
- 6) 垫层：垫层顶面模量平均值为 28.1 MPa，最小值为 3.3 MPa，最大值为 37.2 MPa，变异系数为 22.0%，按取代表值评定方法反计算，垫层下不能满足要求。

为了较好的比较新水泥混凝土板补强的效果，所选试验路段原路况较差，经过灌浆处理板底脱空之后，并破碎处理断裂严重板块后，路面整体强度得到提高，然后在上面对中错缝铺设新水泥混凝土板并设置传力杆。

II. 补强后路面检测汇总

- 1) FWD 弯沉检测得到板的接缝传荷系数 L、达到 90% 以上达到 100%，路段传荷能力满足要求。
- 2) 板底脱空检测：基本没有底板脱空现象，个别板块存在底基层轻微脱空。
- 3) 面板质量：模量均值为 32519.5，面板反算模量最大值为 50000.0 MPa，最小值为 20000.0 MPa，均方差为 3890.0 MPa，变异系数为 13.2%，大于 32000 MPa 的板块约占 5.0%。因此，该段路面面层强度满足。
- 4) 基层（旧板表面）：基层顶面当量回弹模量平均值为 570.3 MPa，最小值为 383.4 MPa，最大值为 974.7 MPa，变异系数为 17.0%，均方差为 98.74 MPa，按取代表值评定方法反计算，基层顶面回弹模量应大于 447 MPa。
- 5) 垫层：垫层顶面模量平均值为 88.5 MPa，最小值为 43.0 MPa，最大值为 163.0 MPa，变异系数为 24.3%，按取代表值评定方法反算，垫层顶面的模量平均值应大于 83.6 MPa 才能满足要求，所以该路段垫层基本上能满足要求。

旧水泥混凝土路面经过新板补强后，明显提高了路面的整体强度，并且较好的减轻了旧路面的不均匀支撑状况。另外，钢筋传力杆的加入使得路面的整体性得到提高，建议对于重载交通路段建设水泥混凝土路面或用水泥路面板补强时应在缩缝处设置钢筋传力杆。

2. 级配碎石加铺层

级配碎石作为散粒结构具有不传递拉应力，拉应变以及级配碎石上基层本身处于

三向受压的特殊受力状态。这种结构上的特点以及受力状态使其能充分吸收其下层裂纹释放的应变能，从而达到止裂效果。另外，何兆益等人的研究表明，级配碎石的非线性特性使其具有重载自适应性，即随着荷载的增加以及底基层模量的增加其自身的模量同样相应增长。

- 1) 旧路说明：旧路经过灌浆和换板处理后，弯沉检测符合规定要求。
- 2) 加铺层检测：路面结构为 1.5cm 下封层+15cm 的级配碎石+旧混凝土路面，检测时用喷漆把原来的旧混凝土路面每一块板画出来，板中为旧混凝土路面板中央，后板边为旧混凝土路面板接缝处，路基基础为挖方路段。
- 3) 反算结构：共分 3 层，1.5cm 下封层+15cm 的级配碎石为第一层，旧水泥路面板为第二层，原基层以下为第三层。
- 4) 级配碎石层评价结果：总共检查 60 块板，反算时 1.5cm 下封层+15cm 的级配碎石为一层，平均模量值为 2237.26 MPa，面板反算模量最大值为 4000.53 MPa，最小值为 1370.4 MPa，变异系数为 29.3%。
- 5) 旧水泥路面板：平均模量为 7776.68 MPa，均方差为 4309.4 MPa，变异系数为 55.1 %。
- 6) 原基层以下：均值为 76.29 MPa，均方差为 26.12 MPa，变异系数为 34.0%。

我们看到，经过 FWD 检测发现旧水泥路面上面加铺 15cm 级配碎石层过后，级配碎石材料的非线性特性得到充分发挥，其模量也相应最大，达到 2237 MPa 左右，充分发挥了非线性特性提高路面的强度。

3. ISAC 复合夹层加铺层

ISAC 复合夹层施工完毕后，加铺沥青混凝土面层，通车一段时间后效果良好。而夹层的存在本身不提高或改变路面的整体强度，检测结果无特殊说明之处，其长期防反射裂缝性能有待进一步观测。

§5.6 本章结论

通过对试验路的前期处理、压浆工艺的评价、试验路段的铺设以及后期观测评价，对于试验段主要结论如下：

- 1) 旧水泥混凝土路面加铺改造之前采用压浆工艺处理脱空板以及错台是一种普遍采用且有一定效果的措施，但是对于脱空较严重的板，压浆工艺并不能有效解决板底基层的破损，并且压浆有时反而带来了板底的应力集中，加剧了板的破坏。
- 2) 规范规定的 20 作为脱空判断标准有一定的局限性，通过对全线一定数量不同脱空程度的水泥板的压浆效果的跟踪观测，认为对于连续 3 块以上旧水泥混凝土板弯沉值大于 50 时的，不要采用压浆工艺，而是采用破碎移除并处理基层或碎石化技术作为底基层使用，否则其上的加铺层也会很快破坏。
- 3) 在强度较高的旧水泥混凝土路面上加铺级配碎石层，级配碎石层的非线性特性和重载自适应性得到了充分的发挥，经 FWD 检测，在高强度的水泥混凝土板上铺筑级配碎石层，在动载检测下，其模量可以达到 2000 MPa 左右，而其作为松散粒料可以有效的消散裂缝尖端的应力集中，由于通常时间不长，其长期荷载作用下抵抗反射裂缝性能有待于进一步观测。
- 4) 在旧水泥混凝土路面上加铺分离式水泥混凝土板，有效的提高了路面的整体强度，减轻了脱空、断裂等病害对加铺层的破坏，具有非常明显的效果。
- 5) 缩缝处钢筋传力杆的加入明显提高了路面的整体性，减轻了接缝处的破坏，有效提高了路面的疲劳寿命，建议对于三滚轴摊铺机施工可以采用本节设计的支架来架设

传力杆。

- 6) 经过试验路施工工艺总结, ISAC 复合夹层中的烧毛土工布宜采用专用进口摊铺机铺设, 无须人工作业, 且摊铺效果非常好, 几乎没有褶皱, 有利于其上自粘式玻纤格栅的进一步施工, 其抵抗反射裂缝的长期使用效果有待于进一步的观测。

第6章 主要结论及进一步研究的建议

§6.1 论文主要结论

本文结合广西壮族自治区国道 322 线全州至桂林旧水泥混凝土路面加铺改造工程, 对多处水泥混凝土路面板下脱空形态进行了现场试验研究, 获得脱空区的形态分布特征, 提出脱空度概念评价旧水泥路面板体的受力, 并在国内外旧水泥混凝土路面加铺层研究的基础上, 结合 FWD 等无损检测技术对路面参数的获取, 利用 ABAQUS 大型有限元软件, 采用 20 节点等参实体三维单元, 评价脱空水泥混凝土路面分离式加铺层的设计, 建立一套道面检测评价和加铺层设计系统。另外、结合国内外旧水泥混凝土路面加铺使用现状, 结合广西地区特点, 提出旧水泥混凝土路面加铺级配碎石、加铺分离式水泥混凝土板以及采用 ISAC 复合夹层三种加铺层结构, 分析其受力特点。论文主要结论如下:

- 1) 参考国内外的相关研究, 对旧水泥混凝土路面各加铺层方案的机理进行分析, 并通过国内外的调研, 结合广西地区的水泥资源丰富, 价格低廉的特点, 提出旧水泥混凝土路面错缝加铺分离式水泥混凝土板补强的方案。
- 2) 在水泥混凝土路面使用末期, 板底脱空和断板现象非常严重, 提出脱空度这一概念, 利用 20 节点三维等参实体单元, 分析脱空水泥混凝土路面板体受力, 研究了不同脱空度对水泥混凝土路面板疲劳寿命的影响, 基于脱空考虑, 新建水泥混凝土路面板厚度应在 26cm 以上, 可以一定程度上提高疲劳寿命。
- 3) 以往水泥混凝土路面缩缝没有设置传力杆, 通过大型有限元软件 ABAQUS 定量分析了设置钢筋传力杆对脱空水泥混凝土板疲劳寿命的影响, 计算表明缩缝设置钢筋传力杆可以增强路面的整体性, 减轻脱空板底的的弯拉应力, 从而提高水泥混凝土路面的疲劳寿命, 采用钢筋单元的有限元计算表明, 钢筋传力杆可以提高脱空水泥混凝土路面 15%~25% 的疲劳寿命。
- 4) 建议在计算缩缝设钢筋传力杆的水泥混凝土路面, 其素混凝土板底计算应力应该乘以 0.8~0.85 的折减系数。
- 5) 结合 FWD 等无损检测技术对路面参数的获取, 利用 ABAQUS 大型有限元软件, 采用 20 节点等参实体三维单元, 提出加铺层设计指标的确立, 进行大量有限元计算分析, 建立一套旧道面检测评价和复合式加铺层设计系统。
- 6) 调研国内外对加铺层反射裂缝的研究, 结合伊利诺斯州的应用研究, 介绍了 ISAC 复合夹层防治反射裂缝的理论和发展, 基于断裂力学—有限元理论, 分析了复合夹层中各层的作用机理。
- 7) 计算表明, 铺设 ISAC 复合夹层的沥青混凝土面层厚度要达到 10cm。
- 8) ISAC 复合夹层作为加筋防水夹层并筑了试验路, 材料采用高强度自粘式玻纤格栅以及浸渍沥青烧毛土工布复合组成, 烧毛土工布采用机器摊铺, 快速且效果好。
- 9) 计算表明, 在重载作用下, 级配碎石可以较好的表现出应力硬化特性。旧水泥混凝土路面级配碎石加铺层的厚度宜控制在 15~20cm, 过厚其受力状态较为不利。
- 10) 旧水泥混凝土路面级配碎石加铺层上沥青混凝土面层的厚度宜控制在 10~15cm, 过厚不经济, 过薄其层底应力及变形较大。
- 11) 通常的旧水泥混凝土路面加铺改造工程中, 对于旧水泥板脱空处治主要采用压浆工艺, 而规范规定脱空评定标准为弯沉值小于 20 个单位, 通过对全线加铺改造工程

的统计总结,认为当弯沉检测超过50个单位时,压浆对解决板底脱空问题并没有多大效果,该类脱空后即使压浆也较多的产生断板,建议对弯沉检测值超过50时,尤其是连续3块板以上时,考虑采用破碎技术,即使用碎石化机械将其砸碎用作底层。

- 12) 试验路级配碎石层的FWD检测表明,级配碎石层本身的松散特性可以较好的消散接缝处的应力集中外,由于底下是一高强度水泥混凝土板,在荷载作用下级配碎石的非线性特性得到充分发挥,经试验路FWD动载检测得知,当直接在级配碎石层表面检测时,级配碎石层的模量此时可以达到2000MPa左右。

§6.2 进一步研究的建议

本文基于脱空度来分析旧水泥混凝土路面板体受力,以及分离式加铺层设计进行了初步研究,在如下几个方面,还有大量的工作需要进行:

- 1) 对于不同脱空度水泥混凝土路面板的疲劳寿命室内试验研究还嫌不足,无法进一步验证其力学分析结果的合理性。
- 2) ISAC材料的设计和室内试验的评价较少,应加大研究。
- 3) 对于脱空尺寸的具体判断的合理性和准确性还需进一步研究。
- 4) 计算模型的层间结合条件的合理性的确定有待验证,尤其是旧水泥混凝土路面板与原有基层之间的结合条件,需要长期的跟踪评价。
- 5) 有待于进一步进行复合夹层材料反射裂缝性能的长期路用性能观测。
- 6) 经过新板补强后的路面,再加罩一薄沥青混凝土加铺层以改善行车性能,而这一类型的加铺层结构研究和应用较少。
- 7) 级配碎石材料的非线性特性与其级配之间对应关系的研究。
- 8) 试验路级配碎石层FWD检测显示了其较好的发挥了力学非线性特性,值得进一步研究和观测。
- 9) 有必要建立旧水泥混凝土路面及其加铺层长期路用性能观测评价,建立系统的评价分析模型。

参考文献

- [1] 赵茂才, 水泥混凝土路面板下脱空探查与岩土工程治理, [D]中国地震局工程力学研究所 2000
- [2] 符冠华, 沥青混凝土加铺层改造旧水泥混凝土路面的应用研究[D]; 南京东南大学 2001
- [3] 中华人民共和国行业标准: 公路水泥混凝土路面设计规范; JTG D40-2002
- [4] 刘春艳. 复合路面反射裂缝的力学分析及防治措施[D], 河北工业大学 2001
- [5] Development and performance of interlayer stress absorbing composite (ISAC) in AC overlays; TRB paper #02-3111; submitted for Publication and Presentation at the 81# Annual TRB Meeting, January 2002
- [6] 何兆益, 碎石基层防止半刚性路面裂缝及路用性能研究[D]; 南京东南大学 1997
- [7] 张建仁, 二灰碎石补强层改造旧水泥混凝土路面应用研究[D]; 南京东南大学 2003
- [8] 廖公云, 水泥稳定粒料收缩特性研究[D]: [硕士学位论文], 南京: 东南大学交通学院, 2001
- [9] 徐春林, 沈云龙, 叶法明. 水泥混凝土路面加铺沥青混凝土面层技术在浙江省的实践和探讨. 华东公路, Vol. 143, No. 4, 2003. 8
- [10] 张玉宏, 王松根, 李昶. 国外水泥混凝土路面碎石化技术简介. 公路, 2003. 9
- [11] 胡富国, 水泥混凝土路面加铺设计[D]; 南京东南大学, 2000
- [12] 唐伯明. 路面结构状况的评价与分析. 东南大学博士论文, 1990. 4
- [13] [美]黄仰贤著 余定选 齐诚译: 路面分析与设计; 人民交通出版社; 1998 年 5 月
- [14] 中华人民共和国行业标准: 公路工程技术标准; JTG B01-2003
- [15] 高维成, 水泥混凝土路面疲劳特性研究[D]; 西安公路交通大学, 2000
- [16] 刘锐, 旧水泥混凝土路面沥青加铺层温度应力分析[D]; 西安公路交通大学, 2000
- [17] 周氏, 李咏偕, 许庆尧, 译. 钢筋混凝土有限元分析 [M]. 南京: 河海大学出版社, 1988.
- [18] 康清梁. 钢筋混凝土有限元分析 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1996.
- [19] 江见鲸. 钢筋混凝土结构非线性有限元分析 [M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1994.
- [20] 沈聚敏, 王传志, 江见鲸. 钢筋混凝土有限元与板壳极限分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1993.
- [21] 宋启根. 钢筋混凝土计算力学 [M]. 南京: 东南大学出版社, 1996.
- [22] 叶丹, CRCP 与 HMA 层路面结构力学分析[D]; 南京东南大学, 2003
- [23] 郑国梁, 王端宜, 张晓辉, 路面雷达在旧水泥混凝土路面加铺层设计中的应用 [J]. 公路, 2003 年 11 月第 11 期
- [24] 魏翠玲, 王复明, 周晶, FWD 无损检测数值的动态分析 [J]; 岩土工程学报, 1999. 7
- [25] Wu,s-s . Concrete Slabs Stabilized by Subsealing : A Performance Report . Transportation Research Record , Transportation Research Board No.1307, 1991
- [26] Federal Highway Administration. Evaluation On Rigid Pavement Overlay Design Procedures. Report No.FHWA/RD-83/090
- [27] M.I.Darter et al, Joint Repair Methods for Portland Cement Pavements .NCHRP Report 281(1985)
- [28] M.Y.Shahin. Use of The FWD for the Non-destructive Deflection Testing of Jointed Concrete Airfield Pavements. Third International conference on Concrete Pavement Design and Rehabilitation, April 23-25, 1985, Purdue University

- [29] L.Travis Chapin and Thomas D.White. Validating Loss of Support for Concrete Pavements, Fifth International conference on Concrete Pavement Design and Rehabilitation
- [30] Elmer C.Hansen, Roy Johnnesen, and Jamshid M.Armaghani. Field Effects of Water Pumping Beneath Concrete Pavement Slabs. Journal of Transportation Engineering, Vol.117, No.6, Nov.1991
- [31] J.M.Lybas et al. Evaluation of A concrete Test Pavement Using The FWD and WESLIQUID. Third International conference on Concrete Pavement Design and Rehabilitation, April 23-25, 1985, Purdue University
- [32] 张宁, 水泥混凝土路路面板下脱空评定[D]; 南京东南大学, 1999
- [33] P.Ullidtz and R.N.Stubstad, Structural Evaluation of Highway and Airfield PCC Pavements Using The Falling Weight Deflectometer , Third International conference on Concrete Pavement Design and Rehabilitation, April 23-25, 1985, Purdue University
- [34] Y.T.Chou, Subgrade Contact Pressure Under Rigid Pavements, T.E.1983, Vol.109, No.3
- [35] 沈成康; 断裂力学; 上海: 同济大学出版社, 1996年3月
- [36] Interlayer stress absorbing composite (ISAC) for mitigating reflection cracking in asphalt concrete overlays: By MUHAMMAD TAHIR MUKHTAR; submitted in partial fulfillment of the degree of Doctor of Philosophy in Civil Engineering in the Graduate College of the University of Illinois at Urbana-Champaign, 1994
- [37] 袁俊, 级配碎石基层性能与设计方法的研究[D]; 南京东南大学, 2003
- [38] 设级配碎石过渡层的半刚性沥青路面结构及特性研究[D]; 长沙交通学院, 2002
- [39] 压浆技术在水泥混凝土路面养护和改善中的应用[J]; 公路, 2000年7月, 第七期
- [40] 曹景明, 赵宗启, 陈明国, 司中军. 采用压浆工艺处理水泥混凝土路路面板底脱空. 中南公路工程. Vol. 24, No. 3, 1999. 9

致 谢

首先我要感谢我的导师黄晓明教授，感谢导师几年来对我的辛勤培育和各方面的关照，导师严谨的治学态度、求实的工作作风、渊博的学识和循循善诱的教导给了我极大的熏陶和教育，使我终生受益。值此论文完成之际，谨向导师表示崇高的敬意！

在论文开展、选题以及具体实施过程中，非常感谢指导老师朱湘副教授一年多来的支持和帮助，在论文写作工程中，赵永利老师、李昶老师、都提出了宝贵的意见，在此深表感谢！

非常感谢广西壮族自治区公路局林有贵高级工程师，周书林工程师在试验路方面给予的大力支持！以及对工程实践的悉心指导！感谢广西322国道全桂路改造办公室所有工程工作人员的关怀和照顾！

王宏畅博士生、季天剑博士生、刘萌成博士生、廖公云博士生等师兄在学习上给予了诸多帮助，李志栋、熊帆等诸位学友在学习上和生活中都给予了我极大的帮助和关心，谢谢你们！

感谢小姨这几个月对我生活上无微不至的照顾，使我能够全身心的投入到论文写作中去，谢谢您！

深深感谢我的家人。二十多年的成长生涯，十多年的求学生涯，都是在他们的关爱和呵护下度过的，是他们的关心、理解和支持使我充满信心地度过了近三年的研究生生活。

谨以此文献给所有关爱和帮助我的人，祝你们幸福、平安！

李春雷

2004年11月24日

攻读硕士学位期间发表的论文

- 1、李春雷、朱湘、林有贵、周书林, ISAC 复合夹层在旧水泥混凝土罩面中的研究, 中外公路, 2005 年第 5 期 (录用)
- 2、李春雷、谢彦、朱湘、林有贵、周书林, 复合式加铺层结构在旧水泥混凝土路面中的应用研究, 交通科技, 2005 年第 1 期
- 3、刘有山、李春雷、李波、凌桂芳、蒋曙萍, 基于灰色系统理论预测路面使用性能, 桂林工学院学报, 2005 年第 5 期 (录用)
- 4、陆勇、李春雷、朱湘, 夹层在接缝水泥混凝土路面 (JCP) 加铺层中的应用研究, 中南公路工程, 2005 年第 2 期
- 5、李春雷、朱湘、林有贵、周书林, 补强层在旧水泥混凝土路面加铺层中的深入研究, 中南公路工程, 2006 第 1 期 (录用)
- 6、李波、梁旺强、陈玉琳、刘有山, 李春雷, 旧水泥路面沥青加铺层夹层结构的力学分析, 桂林工学院学报, 2005 年第 6 期 (录用)