

# 沥青路面典型结构分析

岳秀鹏, 窦文强, 李正博

山东高速集团有限公司沾临项目办, 山东 滨州

收稿日期: 2021年12月20日; 录用日期: 2022年2月25日; 发布日期: 2022年3月4日

## 摘要

公路工程中, 沥青路面的结构形式很多, 本文针对半刚性基层、级配碎石基层、倒装结构以及全厚式沥青路面这几种典型的结构形式, 总结了国内外工程中部分典型的结构组合, 并分析了各自的优缺点、适用性以及受力特性。然后本文基于我国长寿命沥青路面发展的需要, 基于有限元的方法, 着重分析了倒装结构层的受力特点, 总结了各层模量和厚度变化对力学计算指标的影响规律。最后提出了对我国长寿命沥青路面的思考, 指出了我国倒装结构在理论上实现长寿命的潜能和优势, 但还需要大量工程实践的摸索和证明。

## 关键词

典型结构, 倒装结构, 有限元分析, 长寿命沥青路面

# Research on Typical Structure of Asphalt Pavement

Xiupeng Yue, Wenqiang Dou, Zhengbo Li

Zhanlin Project Office of Shandong Hi-Speed Group, Binzhou Shandong

Received: Dec. 20<sup>th</sup>, 2021; accepted: Feb. 25<sup>th</sup>, 2022; published: Mar. 4<sup>th</sup>, 2022

## Abstract

There are many structural forms of asphalt pavement in road engineering. Aiming at several typical structural forms of semi-rigid base, graded crushed stone base, inverted structure and full-thickness asphalt pavement, this paper summarizes some typical structural combinations in domestic and foreign projects, and analyzes their advantages and disadvantages, applicability and stress characteristics. Then, based on the demand of long-life asphalt pavement in China, this paper focuses on the stress characteristics of inverted structure by using the finite element method, and summarizes the influence law of the change of modulus and thickness of each layer on the

**mechanical indexes. Finally, it makes a discussion on the long-life asphalt pavement in China, and points out that the inverted structure in China has the potential and advantages to realize long-life in theory, but it still needs a lot of exploration and proof of practice.**

## Keywords

Typical Structure, Inverted Structure, Finite Element Analysis, Long-Life Asphalt Pavement

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

沥青路面是我国公路的主要形式，在国省道干线路面中占据了90%以上[1]。沥青路面的结构主要包括面层、基层和路基三部分，其中基层是主要的承重层，承受了从面层传递下来的垂直应力，并将其扩散到路基，同时基层一般也是拉应力的主要承受层，因此基层材料的特性对于沥青路面结构的刚度、强度、稳定性以及耐久性等性能至关重要，沥青路面结构的分类也主要是依据基层材料的类型来进行。在我国早期，由于“强基薄面”思想的影响，90%以上的高等级公路沥青路面都采用了半刚性基层结构，其基层和底基层都是由无机结合料稳定材料组成，这种结构具有很强的强度和刚度，但耐久性和稳定性却略显不足，因此我国的沥青路面很多都达不到路面要求的涉及年限[2]。为了克服传统半刚性基层结构的缺陷，同时解决我国路面结构单一性的问题，近年来，我国对于柔性基层、倒装结构等其他类型的结构形式展开了大量的研究和实践，并与半刚性基层进行了对比，本文在此基础上总结现有的一些研究成果，并基于有限元的手段，对我国倒装结构的力学性能进行分析，最后总结对长寿命沥青路面结构形式的思考。

## 2. 沥青路面典型结构组合

### 2.1. 半刚性基层结构

半刚性基层在我国使用最为广泛，我国的高速公路大都采用了沥青面层 + 半刚性基层 + 半刚性底基层的结构。其中，沥青面层大都为14~18 cm，分3层铺筑，少数面层较薄，仅有9~12 cm，分为两层铺筑，而半刚性基层厚度一般为20~40 cm，通常采用强度较高的无机结合料稳定集料来进行铺筑，底基层厚度与其类似，但材料稍次，一般使用的是无机结合料稳定土。表1给出了我国部分采用半刚性基层的高等级公路的路面结构形式[3]。

半刚性基层结构中的面层是直接的荷载接触层，承受了较大的压应力和由于加减速、启动、制动等因素造成的水平剪应力，因此面层要有足够的抗车辙能力。而半刚性基层承受了从面层传递下来的压应力，同时层底承受了由于弯拉特性引起的拉应力，因此半刚性基层是结构中的主要承重层。单从受力角度而言，半刚性基层结构实际上是一种十分合理的结构形式，因为无机结合料稳定材料强度和模量较高，板体性强，与半刚性基层的受力特性适应性很好。但实际工程中，半刚性基层结构的使用效果往往并不理想，这实际上并不是因为半刚性基层的力学性能不足所导致的，而是因为无机结合料稳定材料本身的稳定性和耐久性不足，导致力学性能的衰减，进而引发的破坏。总的来说，半刚性基层结构具有如下的优缺点[2]：

**Table 1.** Some pavement structure forms of domestic high-grade highways with semi-rigid base  
**表 1.** 国内部分半刚性基层高等级公路路面结构形式

公路名称	长度(km)	路面结构		
		沥青面层(cm)	基层(cm)	底基层(cm)
广佛	15.7	4 中粒 + 6 粗粒 + 6 沥青碎石(13.9 km)	25 水泥碎石	25~28 水泥石屑
		4 中粒 + 5 粗粒(1.8 km)	31 水泥碎石	25 水泥石屑
西临	双幅 16.3	4 中粒 + 5 粗粒 + 6 沥青碎石	20 二灰砂砾	20 二灰土
	单幅 5.7	5 中粒 + 7 沥青碎石		
沈大	375	4 中粒 + 8 沥青碎石	15~18 水泥砂砾	15~39 砂砾或矿渣
		5 中粒 + 5 粗粒 + 5 沥青碎石		
京津唐	142.5	20~25 (中粒 + 粗粒 + 沥青碎石)	20~25 水泥粒料	20~35 无机结合料稳定土
西三	32	12 (中粒 + 沥青碎石)	18 二灰碎石	30 二灰土

半刚性基层结构的优势:

- 1) 刚度和承载能力都较高, 结构板体性强, 抗变形能力强;
- 2) 造价低廉, 方便就地取材, 施工方便。

半刚性基层结构的缺陷:

- 1) 无机结合料稳定材料容易产生干缩和温缩开裂, 进而引起沥青路面的反射裂缝;
- 2) 无机结合料稳定材料水稳定差, 抗冲刷能力弱, 容易产生唧浆等病害;
- 3) 由于开裂和水损害等因素的影响, 半刚性基层的强度和刚度衰减严重, 造成路面结构整体性能的下降;
- 4) 半刚性基层的疲劳开裂对轴载的敏感性很高, 在我国超载严重的情况下, 很难达到设计的使用寿命。
- 5) 半刚性基层压实后表面过密, 喷洒透层油后渗透情况不佳, 因此, 半刚性基层与沥青面层间的粘结很难达到设计假定的完全连续的状态, 容易产生脱空和开裂。

正是因为半刚性基层具有上述的缺陷, 因此在实际使用过程中, 务必要遏制裂缝和水损害的产生, 才能发挥好半刚性基层结构良好的力学性能。实际工程中, 可以考虑从材料设计、结构设计以及施工工艺等多方面进行改善: 例如做好级配设计, 选择骨架密实型结构; 设置应力吸收的隔离层; 做好施工过程中的养护和补水工作; 做好排水和隔水措施, 减少水分下渗入基层, 避免动水冲刷等。如果难以做到对裂缝和动水冲刷的遏制, 则半刚性基层往往难以发挥预期的使用效果, 此时应考虑其他的结构形式。

## 2.2. 级配碎石基层结构

传统的半刚性基层结构由于缩裂特性和水损害, 容易产生早期破坏, 尤其是在东部区域的长江中下游平原、四川盆地和云贵高原等地区, 道路早期损坏问题十分严重<sup>[4]</sup>。为了克服半刚性基层的缺陷, 国内不少学者都把目光转向了柔性材料, 例如沥青稳定碎石和级配碎石等。其中级配碎石可以作为路面结构的上基层, 配以无机结合料稳定材料作为底基层, 形成倒装结构, 可以有效遏制反射裂缝的产生, 也可以作为路面结构的底基层, 配以无机结合料稳定材料或沥青稳定材料的上基层, 可以有效减小路基不

均匀沉降的影响,同时也具有隔水或排水的作用,当然也可以直接全部使用级配碎石材料,形成完全的级配碎石基层结构,不过这种结构抗变形能力较弱,实际承载能力并不高,因此在高等级公路中很少使用,但在等级较低的公路中,确有应用的实例。例如广西南宁三塘至五塘的二级公路,就使用了5 cm 沥青碎石 + 27 cm 级配碎石的结构,该公路实际服役的轴载累积作用次数远大于设计值,路用性能表现十分优越[5]。

与半刚性基层沥青路面相比,级配碎石基层结构最大的优势在于不再有反射裂缝的干扰,因此在轻交通荷载作用下,级配碎石基层结构往往能使用很长时间,其稳定性和耐久性要优于半刚性基层结构,在破坏之前表现出了很强的安定性[6],这也是柔性基层材料的共性。此外级配碎石基层结构还具有排水性能好、行车舒适度高的优势[7]。但级配碎石终究属于无粘结材料,其力学强度的形成主要依赖于集料之间的嵌挤,因此级配碎石基层必须要有良好的级配设计,形成嵌挤结构才能发挥出力学性能。同时级配碎石结构还具有明显的应力依赖性,其强度和刚度依赖于侧限的围压应力,但实际工程中,能提供的围压是有限的,因此级配碎石结构的强度和模量终究不能与有粘结材料相比,而且级配碎石结构不能承受拉应力,不具备板体性,这些是它的缺陷,导致纯级配碎石基层的路面结构无法在高等级公路中使用,只能应用于小交通荷载的较低等级公路中。此时,整个结构中,沥青层承受了主要的压应力、拉应力和剪应力,级配碎石层在结构上更多的是传递荷载的作用,将沥青层中的压应力传递到路基中,同时有一定的缓解路基差异性沉降的效果。

### 2.3. 倒装结构

倒装结构是指对基层的倒装,即在底基层使用刚度较高的无机结合料稳定材料,而在基层使用柔性的级配碎石或沥青稳定材料的结构。表 2 给出了国内外部分典型的倒装结构的路面结构形式[8]:

**Table 2.** Some pavement structure forms of typical inverted structures at home and abroad  
**表 2.** 国内外部分典型倒装结构的路面结构形式

国家和地区	沥青面层及厚度(cm)	基层及厚度(cm)	底基层及厚度(cm)
德国	4 + 8 沥青混凝土	18ATB + 15 级配碎石	15 水稳砂砾层
法国	8~10 沥青混凝土	17 沥青稳定粒料	25 水泥稳定层
荷兰	4 + 4 沥青混凝土	12~18 沥青稳定砂砾	15~40 水泥稳定砂砾
瑞典	5 沥青混凝土	7.5 沥青稳定碎石	18 水泥稳定砂砾
日本	4 + 6 沥青混凝土	8~14 沥青稳定碎石	20~25 水泥稳定层
南非	5 沥青混凝土	15 级配碎石	30~40 水泥稳定层
福建省(重交通)	4.5/4 + 5.5/6 沥青混凝土	16ATB + 16 级配碎石	30 水稳碎石
福建省(轻交通)	4.5/4 + 5.5/6 沥青混凝土	12ATB + 10 级配碎石	30 水稳碎石
黑龙江	4 + 6 沥青混凝土	8+8ATB	18 水稳碎石层 + 30 二灰土

根据表 2,可以发现,对于倒装结构中的柔性材料,国外主要使用的是沥青稳定材料,而国内更偏向于级配碎石材料。这与两者沥青路面发展历史的差异有关,国外大都以柔性路面为主,以沥青混合料层为主要受力层,对无机结合料稳定材料使用较少,即便在倒装结构中有所涉及,但总的来说厚度较薄,并不能在承担荷载方面发挥很大作用。而我国一直以半刚性基层沥青路面为主,虽然引入了倒装结构,

但也并不愿放弃半刚性层高刚度和高强度的优势,因此,其厚度相对更厚,能承受一定的荷载,而基层便可以相对国外进行一定的削弱,使用级配碎石材料或者是级配碎石与 ATB 的组合。

目前来看,倒装结构在我国南方多雨地区使用较多,因为在这些地区半刚性基层损害比较严重,需要引入级配碎石层进行改善。总的来说,在我国引入这种倒装结构具有如下的优势[9]:

1) 级配碎石属于散粒结构,具有一定的抗压强度,但不能传递拉应力和拉应变,因此,级配碎石层可以很好地吸收半刚性层开裂释放的应变能,能够抑制反射裂缝的产生。

2) 级配碎石层在中间能起到隔离层的作用,使下方的半刚性层受温度湿度变化影响小,减少了环境因素变化引起的开累。

3) 级配碎石层具有很好的排水效果,避免了水分在基层集聚,从而引起的冲刷现象。

4) 由于下卧层半刚性层的刚度较大,有利于级配碎石层充分碾压获得较高的密实度,同时较高的下卧层刚度也有利于发挥级配碎石非线性的受力特性,即围压越大,模量越高。

当然这种倒装结构也存在着自身的缺陷[10]:因为级配碎石层对设计和施工的要求很高,它要求有最佳的级配组成和良好的压实质量,才能形成密实的嵌挤结构,才能发挥出其非线性的受力特性,形成较高的模量。另外,倒装结构从根本上改变了原本半刚性基层结构的受力分布:原本半刚性层与沥青层直接接触,完全连续,半刚性层模量很大,相当于对沥青层底有约束作用,因此沥青层层底一般不会产生拉应力,但由于级配碎石的引入,相当于在两者之间加入了软弱夹层,沥青层层底的约束作用大大减弱,由此产生了弯拉应力,导致沥青层成为了荷载的重要承担层,而半刚性层承受的弯拉应力大大降低,级配碎石层厚度越大,这种现象越明显。因此,级配碎石的引入实质上会导致原本半刚性基层中的弯拉应力转嫁到了沥青层,沥青层负担加重,所以我国在引入级配碎石基层后一般都需要对沥青层进行加厚,例如表 2 中福建省便同时加入了 ATB 层,为的便是加强沥青层的承载能力。最后需要指出的是级配碎石层的引入会增大路面永久变形量,同时过厚的级配碎石层也不利于发挥半刚性层的承载能力,所以实际工程中级配碎石层厚度有限,当然也不能过薄,过薄不利于反射裂缝的吸收,所以实践中级配碎石的厚度一般为 10~20 cm [11]。

#### 2.4. 全厚式沥青路面

全厚式沥青路面在国外使用较多,是美国、德国、法国等国高等级公路的主要结构形式,其中全厚式的沥青层一般由沥青混合料面层 + 沥青稳定材料基层构成,整体的厚度法国一般为 23~47 cm,德国一般为 22~34 cm,美国实际使用一般为 18~50 cm [12]。在 2002 年, AASHTO 指南中,也给出了推荐厚度,对于 12~100 百万标准轴次对应的沥青层厚度一般取 29~43 cm [13]。但值得一提的是,在不同国家,全厚式沥青路面的概念有所差别,美国的全厚式沥青路面被严格定义为路基之上只有沥青材料,如果加铺了无机结合料稳定层或者粒料层就都不属于全厚式沥青路面,其中加铺粒料底基层的结构被称为高强度厚沥青层路面。但在法国,全厚式沥青路面一般要求设置一定厚度的无机结合料处置层或者粒料层,德国也要求需要设置一定厚度的粒料层,相当于美国的高强度厚沥青路面结构。

但无论有没有加铺无机结合料稳定层或者粒料层,其路面结构的受力原理都是一致的,即利用沥青层作为主要甚至全部的承重层,承担压应力、剪应力和拉应力,这就要求沥青层具有较高的厚度。沥青层越厚,层底的拉应变便会越小,如果沥青层的厚度超过某一阈值,以至于沥青层底的拉应变小于材料的疲劳极限,那么理论上沥青层便永远不会发生弯拉形式的疲劳破坏,也就不会产生 down-top 类型的贯穿结构层的裂缝。当然,由于路表水平拉应变、沥青老化以及温度应力等原因,沥青层往往会产生一定量的 top-down 类型的裂缝[14],但这种裂缝一般仅仅局限于路表,只需要进行及时的罩面修复,便不会扩展到整个结构层,形成结构性损坏[15]。因此,全厚式沥青路面只要沥青层厚度足够,理论上来说可以



通过及时的养护维修实现长期甚至永久的使用，这是全厚式沥青路面最大的优势，也正是因为如此，全厚式沥青路面成为了国外长寿命沥青路面或永久性沥青路面的主流。

最后，需要指出的是，并不是柔性的全厚式沥青路面车辙变形就一定比半刚性基层沥青路面大，因为在半刚性基层结构中，由于下卧层刚度过大，导致沥青层的剪应力会很高，而在全厚式沥青路面中，由于面层和基层模量相近，变形协调更好，此时其剪应力相对于半刚性基层结构会更小，相应的由于侧向流动引起的车辙变形也会减小，因此没必要对全厚式沥青路面的车辙变形量过分担忧[16]。

### 3. 倒装结构的力学分析

实际工程中，路基路面的结构形式很多，本文在第一节中节选了四种比较典型的结构形式，但在这四种结构中，半刚性基层路面一直饱受早期开裂的干扰，而级配碎石沥青路面难以满足高等级道路的要求，只有倒装结构和全厚式沥青路面，无论是力学表现还是长期使用性能，都能保持良好且稳定，符合当前长寿命沥青路面建设的需要。不过在我国，由于历史和成本等因素的影响，无机结合料稳定材料仍然在路面结构中被广泛保留，因此全厚式沥青路面在我国使用较少，而倒装结构现在反而使用较多。因此，在本节中，也将主要针对倒装结构进行力学分析，另外，本文所采用的力学计算方法主要是基于ABAQUS的有限元法。

#### 3.1. 初始模型参数

路面结构设计过程中的力学计算一般基于的是弹性层状体系理论，并采用标准的双圆形荷载，所选取的计算面是双圆荷载横向对称轴所在面，因为设计过程中需要计算的力学指标都是在该面达到最大值。这里，值得一提的是，由于对称性，该面上任意一点在垂直于该面方向上的位移为零，应变很小，与平面应变状态接近，因此，可以将实际的三维模型简化成平面应变模型。当然，由于车辆荷载与路表的接触面并不是长条形结构，因此这样的简化会造成力学响应计算结果偏大，与实际设计不符，但本文主要是定性分析路面结构参数变化对力学响应变化的影响规律，不要求对实际荷载作用下结构力学响应的量值进行精确计算，因此，这样的简化是可以接受的。

另外，路面结构设计中，使用双圆形荷载更多的是为了方便使用弹性层状体系理论进行计算，但实际上，由于轮胎扁平化的发展趋势，当今汽车轮胎与路表的接触面更接近于矩形，因此，在有限元分析中，如果采用平面应变模型，一般会使用标准的双矩形荷载，如图1所示，为了与双圆形荷载等效，图中L一般取19.2 cm，此时两者面积相等，标准轴载下的接触压力一致[9]：

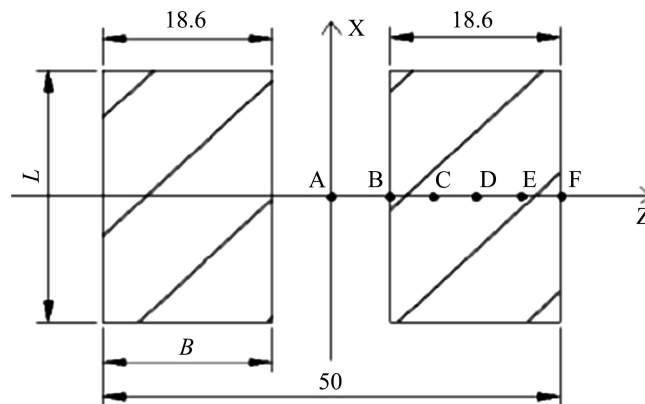


Figure 1. Schematic diagram of double rectangular load (unit: cm)

图1. 双矩形荷载示意图(单位: cm)

而对于路面结构, 本文针对倒装结构, 建立了  $3 \times 6 \text{ m}$  的有限元模型, 并分为 6 层, 各层材料以及初始的参数如表 3 所示[17]:

**Table 3.** Initial model parameters of inverted structure

**表 3.** 倒装结构初始模型参数

结构层	材料名称	厚度(cm)	模量(MPa)	泊松比
表面层	沥青玛蹄脂 SMA	4	10,000	0.25
下面层	沥青混凝土 AC20	6	9000	0.25
基层	沥青稳定碎石 ATB	24	7000	0.25
上底基层	级配碎石 GM	15	300	0.35
下底基层	水泥稳定碎石 CTB	20	10,000	0.25
路基	压实土 SG	—	50	0.4

### 3.2. 倒装结构的受力特性

图 2 给出了在轮隙中心点所在轴以及矩形荷载中心点所在轴处, 结构竖向压应力随深度方向的变化规律。可以看到, 在矩形荷载中心轴处, 竖向压应力一直随深度增加而减小, 沥青层中竖向压应力较大, 但衰减很快, 到级配碎石层竖向应力就已经很小, 而到了无机结合料稳定层, 竖向压应力已不足最大值的 20%。因此可以发现, 倒装结构中, 无机结合料稳定材料的底基层由于深度太深, 在承担压力荷载方面并没有显著作用。而在轮隙中心轴处, 其路表在竖向会产生拉应力而非压应力, 随后, 随着深度增加, 拉应力会不断衰减乃至变成压应力并增大, 达到峰值之后又会呈现衰减趋势, 这是由于双矩形荷载应力泡叠加的缘故。不过总的来说, 在沥青层轮隙中心轴处的竖向压应力是小于荷载中心轴的, 另外, 在沥青路面设计中, 在考虑最不利位置时, 除了这两个轴外, 还有其它三个轴, 但对于竖向压应力而言, 这三个轴上的量值都是介于图中两条曲线之间的, 因此, 在进行沥青混合料累计变形验算时, 可以取荷载中心轴作为最不利位置。

图 3 给出了倒装结构水平拉应力的分布云图。可以看到, 有两处集中分布有水平方向的拉应力, 其所在位置正是沥青层和无机结合料稳定层的层底, 这验证了倒装结构由于存在着软弱夹层, 导致沥青层和无机结合料稳定层层底均会产生拉应力, 在进行结构疲劳验算时, 这两处均要进行验算, 这是倒装结构设计过程中相对于传统半刚性基层结构最大的不同。

图 4 给出了荷载中心轴和轮隙中心轴处水平拉应力随深度的变化规律。可以看到除了路表一定范围内, 其余深度处两轴上点的水平拉应力是非常接近的, 对于水平拉应力而言, 其余 3 个需要考虑的最不利位置点所在轴上的应力量值也是介于这两轴之间的, 因此, 在计算最不利位置水平应力时, 可以任取一个轴。另外, 沿深度方向水平拉应力的变化并不像竖向压应力变化那样连续, 而是具有一定的突变特性, 突变发生在材料的过渡界面上, 尤其是沥青层到级配碎石层、级配碎石层到无机结合料稳定层以及无机结合料稳定层到路基层这三处, 突变现象表现得非常明显, 这是由于完全连续的假设要求不同材料在界面上的应变相同, 但由于模量差异巨大, 导致应力在界面处发生剧变。最后需要指出的是, 根据图 4 也可以观察到水平拉应力有两个峰值, 分别出现在了沥青层底和无机结合料层底处, 这与之前的结论以及实践一致。

最后, 关于剪应力, 目前主流的研究认为: 沥青层中剪应力随着深度方向先增大后减小, 一般在 5~10 cm 范围内达到峰值, 随后减小, 如图 5 所示, 此时剪应力的最不利位置在荷载外边缘的轴上, 由此得出

结论：中面层会承担最大的剪应力，因而要具有较强的抗车辙能力。但需要指出的是，这里的剪应力是指平行于坐标轴平面的水平向或竖向的剪应力，并不是材料中某点的极限剪应力，而实际工程中，沥青路面的车辙变形并不是因为某一固定水平面或竖直面的剪切破坏，而是由于某一平面上切应力达到极限值后塑性变形引起的材料的侧向流动，这个极限值可以近似用最大剪应力来表征，但与坐标轴平面上的剪应力有很大不同。而结构中最大剪应力的分布与坐标轴平面剪应力的分布也并不一致，如图 6 所示。

最大剪应力的最不利位置已经不是在荷载外边缘的轴上，而是与压应力或拉应力类似，需要计算 5 个可能的最不利位置点。图 6 给出了轮隙中心轴和荷载中心轴上最大剪应力随深度的变化规律，可以看到两者量值在深层处比较接近，但在沥青层中有一定差距。不过，在沥青层中，它们都具有相同的变化规律：都是在路表达到最大值，随后减小，但在降低到极值之后又有所回弹，整个沥青层的最大剪应力分布呈现出上下高中间小的状态。这就要求整个沥青层的上部和下部都要求较强的抗车辙能力，当然由于下部温度偏低，抗车辙的要求可以适当减弱，但不能忽视。

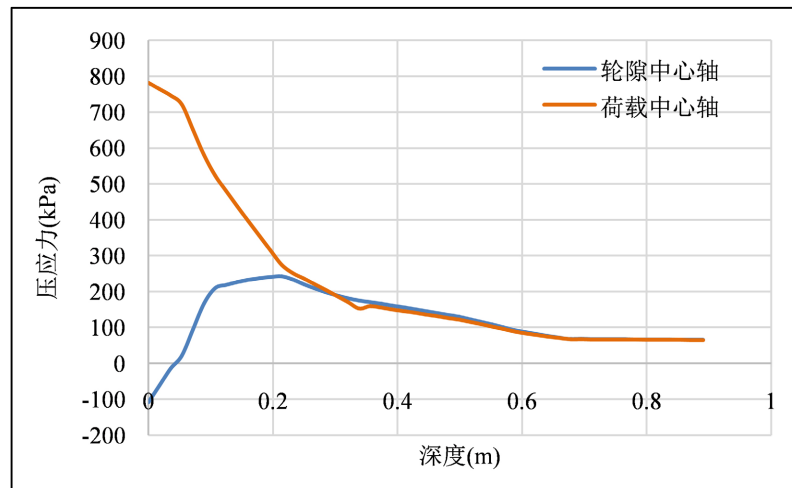


Figure 2. Variation of vertical compressive stress with depth in inverted structure

图 2. 倒装结构中竖向压应力随深度变化规律

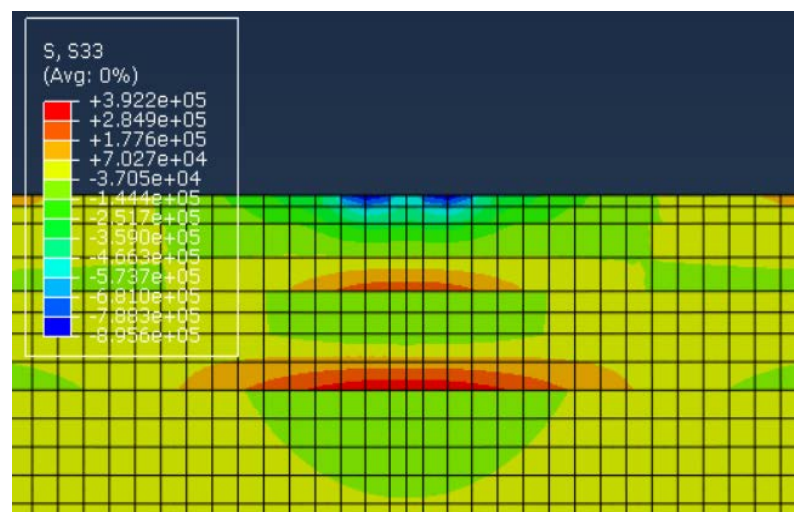
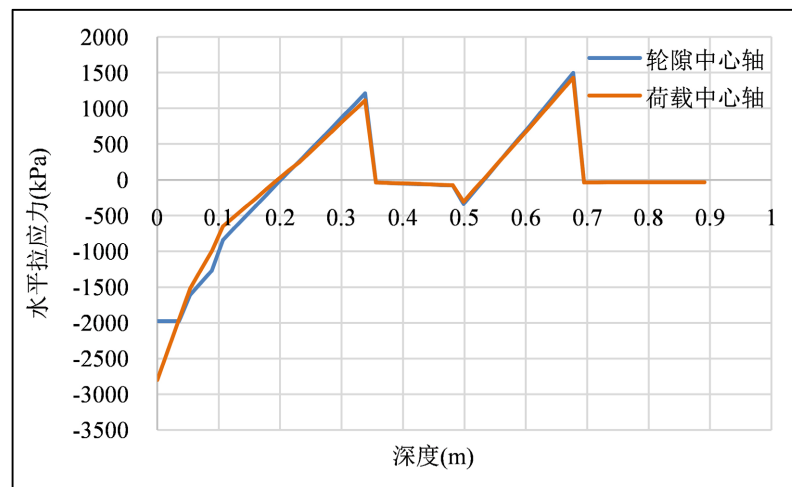


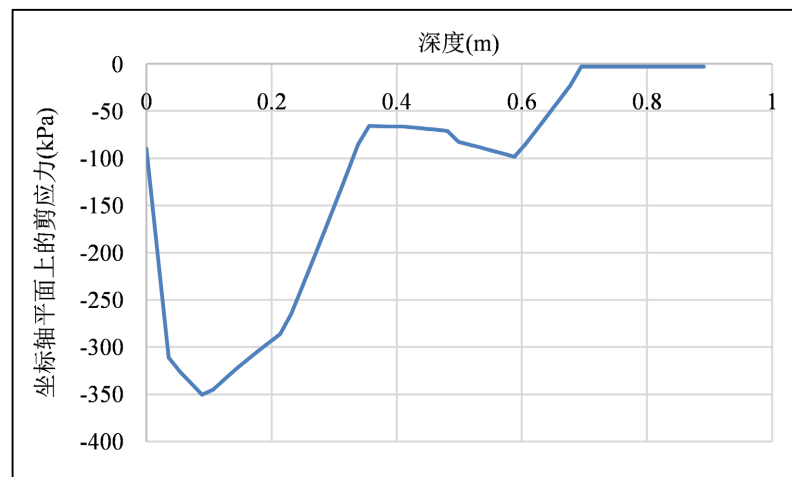
Figure 3. Cloud chart of horizontal tensile stress distribution in inverted structure

图 3. 倒装结构水平拉应力的分布云图

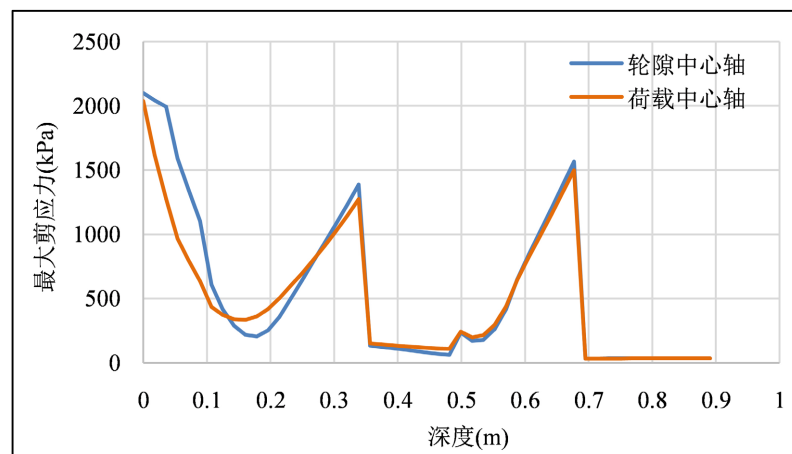




**Figure 4.** Variation of horizontal tensile stress with depth in inverted structure  
**图 4.** 倒装结构中水平拉应力随深度变化规律



**Figure 5.** Shear stress on the plane of coordinate axes in inverted structure  
**图 5.** 倒装结构中坐标轴平面剪应力



**Figure 6.** Variation of the maximum shear stress with depth in inverted structure  
**图 6.** 倒装结构中最大剪应力随深度变化规律

### 3.3. 参数变化的影响分析

倒装结构中，级配碎石层并不能在受力方面发挥重要作用，其在整体结构中更多的是发挥遏制半刚性基层反射裂缝的功能性作用，因此级配碎石层的模量和厚度对整体结构影响并不大，实际工程中其厚度一般也是按经验取为 15 cm 左右。故而在本节中，不再对级配碎石层的参数进行改变，着重研究沥青层以及无机结合料稳定层厚度和模量变化对力学响应的影响。另外，对于长寿命沥青路面而言，最核心的要求是路面不至于发生结构性病害，而对于车辙、裂缝等病害可以考虑通过材料设计、施工优化以及后期养护等措施来弥补，因此本节在这里主要计算的力学指标是沥青层层底的拉应变和无机结合料稳定层层底拉应力。

沥青层参数的变化主要通过改变 ATB 层的模量和厚度来实现，表 4 给出了 ATB 层模量改变后结构力学响应的变化规律。可以看到，随着 ATB 层模量的增大，沥青层层底的拉应变及无机结合料层层底的拉应力均呈现出减小趋势。实际上增大沥青层模量会使沥青层承担的弯拉荷载增大，因此无机结合料稳定层承担的弯拉荷载便会相对减小，故而其层底拉应力不断减小，而沥青层层底拉应力实际上是增加的，其拉应变减小是由于模量增大的缘故。这说明，增加沥青层模量对于提高无机结合料稳定层的使用寿命是有利的，但对于沥青层未必如此，因为一般沥青材料的模量与其疲劳寿命是负相关的，因此，增大模量未必会使沥青层使用寿命延长，实际设计过程中需要对此综合考虑。

**Table 4.** Variation of mechanical responses with the modulus of ATB layer

**表 4.** ATB 层模量改变后的力学响应变化表

ATB 模量(MPa)	沥青层层底拉应变( $\mu\epsilon$ )	无机结合料层层底拉应力(MPa)
7000	171.8	1.63
8000	165.3	1.60
9000	159.6	1.57
10,000	154.6	1.54
11,000	150.1	1.52

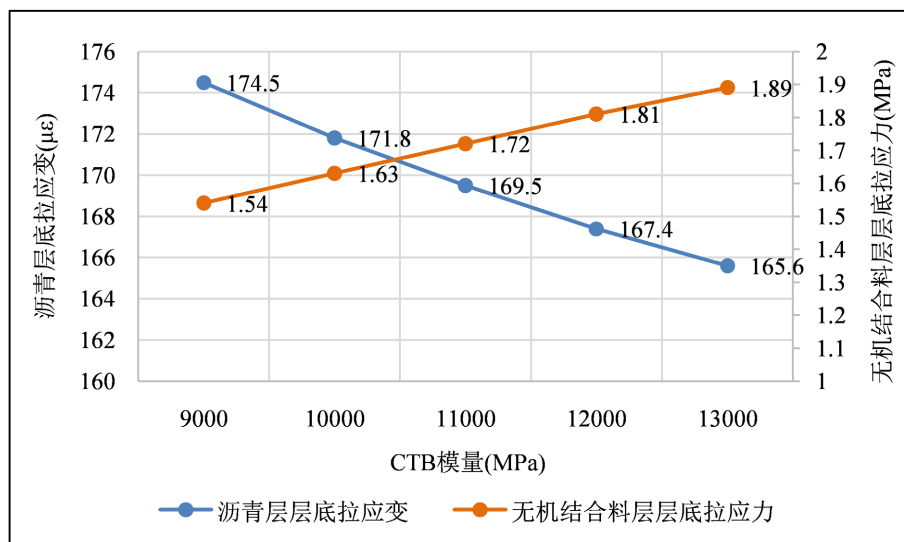
同样，保证初始模型的其他参数不变，只改变 ATB 层的厚度，得到相应的力学响应变化如表 5 所示。可以看到，与模量改变的结果类似，ATB 层厚度的减小，会导致沥青层承担的弯拉荷载减小，而无机结合料稳定层承担的弯拉荷载增大，因此，无机结合料稳定层层底的拉应力会不断增大，同时其增大的幅度远远大于由于 ATB 层模量改变引起的变化幅度，说明无机结合料稳定层层底拉应力对沥青层厚度敏感性更高。另外，减小 ATB 层厚度，沥青层层底拉应变先增大后减小，这是因为减小厚度一方面会使沥青层承担荷载减小，但另一方面也会使在相同弯拉荷载作用下沥青层底的拉应力和拉应变增大，两个因素在不同阶段主导地位不同，因此会有不同的变化趋势。但总的来说，沥青层厚度达到一定值后，继续增加沥青层厚度，沥青层底的拉应变和无机结合料稳定层层底拉应力都会减小，若减小至小于材料的疲劳极限，理论上便会成为长寿命沥青路面。

图 7 给出了 CTB 层模量改变的结果。可以看到，随着 CTB 层模量的增大，沥青层底拉应变减小，而无机结合料层层底拉应力不断增大，这实际上也是由于弯拉荷载在两层之间分配变化的结果，在原理上与之之前并无区别。但通过对比可以发现，增大 CTB 层模量，虽然可以减小沥青层的拉应变，但并没有

增大沥青层模量效果明显, 同样, 减小沥青层模量, 可以增大无机结合料层层底拉应力, 但也没有增大 CTB 层模量效果明显。说明这两层的力学响应变化对其本身层的参数变化更为敏感, 改变另一层的参数虽然可以取得类似的效果, 但在影响幅值上稍显不足。

**Table 5.** Variation of mechanical responses with the thickness of ATB layer  
**表 5.** ATB 层厚度改变后的力学响应变化表

ATB 厚度(cm)	沥青层底拉应变( $\mu\epsilon$ )	无机结合料层底拉应力(MPa)
24	171.8	1.63
20	179.0	1.87
16	182.6	2.15
12	180.2	2.47
8	170.4	2.85



**Figure 7.** Influence of CTB layer modulus on structural mechanical responses  
**图 7.** CTB 层模量改变对结构力学响应的影响

图 8 给出了 CTB 层厚度变化的结果。可以看到, CTB 层厚度增大, 会导致无机结合料稳定层层底拉应力的减小, 但值得一提的是, 这里与沥青层厚度变化的影响类似, 实际上有两个因素在共同作用, 一方面厚度增大会导致无机结合料承担的弯拉荷载增大, 这原本会导致应力的增大, 但另一方面同等荷载作用下增大厚度会导致应力减小。在本次模拟的工况中, 显然第二个因素占据了主导作用, 但并不排除在某些参数条件下, 出现厚度增大, 拉应力也同时增大的情况, 此时将是第一个因素占据主导地位。但可以确定的一点是, 随着厚度增大, 弯拉荷载的增长趋势会放缓, 也就是说第一个因素的影响会不断减弱, 所以只要厚度达到一定值, 后续继续增加厚度时, 拉应力必定会不断减小。另外, CTB 层的厚度增大, 同样也会导致, 沥青层层底拉应变的减小, 并且与模量增大的结果相比, 显然沥青层底拉应变对厚度更为敏感。

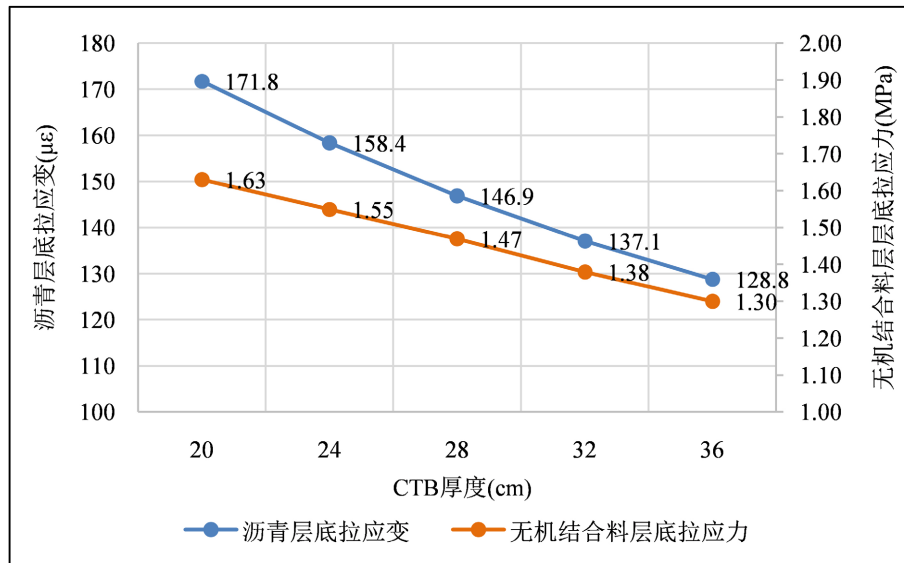


Figure 8. Influence of CTB layer thickness on structural mechanical responses

图 8. CTB 层厚度改变对结构力学响应的影响

总的来说, 沥青层与半刚性层厚度和模量变化的影响都是比较类似的, 因为它们原理一致, 提高沥青层或半刚性层的厚度或模量都相当于增强该结构层, 会导致该层承担的弯拉荷载加大, 而另一层承担的荷载则相对减少。但并非是承担荷载加大, 该层计算的力学指标就一定增大, 因为有时候模量或厚度对力学指标的影响存在着两方面因素的共同作用。另外, 就参数敏感性而言, 某一层层底的拉应力或拉应变对本层模量变化更为敏感, 对另一层的模量变化的响应幅度稍弱, 但对于厚度, 却不一定有这个规律, 主要是本层厚度变化会对本层应力应变响应产生两方面的影响, 且这两方面影响的效果是相反的。此外, 一般而言, 如果要比较某一层参数变化对另一层力学指标的影响, 调整该层的厚度比调整模量变化更为明显, 但如果是研究本层参数对本层力学指标的影响, 就未必有这个规律, 这也是由于厚度对本层力学响应的影响有两个方面所导致的。

#### 4. 长寿命沥青路面的思考

长寿命沥青路面最早由欧洲提出, 主要针对的是重载沥青路面, 其设计基本理念是要求路面能够使用 40~50 年以上, 在设计年限内只需针对表面的可修复层进行周期性的养护和修复即可保证道路的使用性能, 而无需结构性的修复和重建[12]。国外的长寿命沥青路面主要指的是全厚式沥青路面, 这里的全厚式沥青路面是广义的全厚式, 包括沥青层直接铺筑在路基上以及沥青层铺筑在粒料或无机结合料稳定材料底基层上 3 中情况。其原理在于使用较厚的沥青层, 使得沥青层底的拉应力低于材料的疲劳极限, 进而避免了 down-top 类型的疲劳开裂, 这样便不会产生贯穿结构层的结构性裂缝。当然, 随着路面使用年限的增长, 沥青路面也会不可避免地产生 top-down 类型的裂缝, 但这种裂缝自表层产生, 很容易被发现, 只要及时地进行养护和修复, 便不会扩展至整个结构层, 进而保证整个路面结构的长期使用性能。这是长寿命沥青路面的原理和最核心的要求, 但不少国家对长寿命沥青路面修复层的使用寿命以及整个使用年限内综合的服务水平也有严格要求, 因此长寿命沥青路面一般还要求面层和中层有较强的抗车辙能力, 同时表面层有较强的抗磨耗能力。

我国与西方国家路面结构的发展历史不同, 我国主流的路面结构是半刚性基层沥青路面。其实单从力学原理上来看, 半刚性基层沥青路面并非不能达到长寿命的要求, 因为半刚性材料同样存在着疲劳极

限, 理论上来说只要层底拉应力低于疲劳极限, 半刚性基层沥青路面也能长期使用。而我国之所以半刚性基层路面的使用寿命偏低, 是因为无机结合料稳定材料本身的稳定性和耐久性不足的缘故, 其干缩温缩特性以及水损害使得其无法长期保持优良的力学性能, 进而在荷载作用下产生难以修复的结构性损坏。近年来, 我国沥青路面建设也有向长寿命沥青路面发展的趋势, 但我国并不愿完全放弃长期以来一直使用的半刚性基层结构, 而是更倾向于对该结构的改良, 倒装结构便是其中一种主流的做法。倒装结构实质上是全厚式沥青路面与半刚性基层沥青路面的结合, 其半刚性基层顶部引入了级配碎石结构, 一方面可以遏制半刚性层的反射裂缝, 并减小了温度变化对该层的影响, 同时还有良好的排水效果, 减少了半刚性层的水损害, 进而提高半刚性层的长期使用能力, 但另一方面同时也会导致沥青层层底出现拉应力, 为此倒装结构也需要对沥青层进行加厚, 这一点与全厚式沥青路面一致。

倒装结构若想实现长寿命, 则沥青层层底的最大拉应变及无机结合料稳定层层底的拉应力均要小于材料的疲劳极限, 虽然看起来要求变多, 但在成本上, 倒装结构是有优势的。因为原本全厚式沥青路面荷载都是沥青层承担的, 而根据第 2 节的模拟结果, 倒装结构相当于利用半刚性层分担了一部分荷载, 使得沥青层力学响应减弱, 因此沥青层厚度可以相对减小, 道路工程中, 沥青层的成本要远高于半刚性层, 因此这样的做法对于节省造价是比较有利的。

最后, 需要指出的是, 我国近年来进行了不少倒装结构的路面建设, 但在很多工程中存在着错误的倾向, 其对于路面各层的重视程度自上而下逐渐降低, 但对于长寿命沥青路面而言, 其上层都是可以修复替换的, 唯有底层需要长期使用, 倒装结构的半刚性底基层原本在耐久性方面就比较脆弱, 因此加强半刚性底基层的设计和施工质量就显得尤为重要, 否则将很难达到长寿命的要求。另外, 国外的全厚式沥青路面之所以能被称为长寿命路面, 是建立在大量实践经验总结的基础上, 但倒装结构在我国起步较晚, 目前还只是在理论上认为其具有实现长寿命的潜能, 并没有大量工程实践证明其在长寿命方面的可行性, 因此我国的倒装结构若想提高使用寿命, 还需长期的工程摸索, 对于其中的一些细节问题, 例如沥青层和半刚性层的厚度分配还需要大量的研究和总结。

## 5. 总结

本文针对半刚性基层、级配碎石基层、倒装结构以及全厚式沥青路面 4 种典型的沥青路面结构形式, 总结了其在国内外工程实践中使用的一些典型结构组合, 并针对其各自的优缺点、适用性和受力特点进行了分析。然后基于我国长寿命沥青路面发展要求, 针对我国常用的倒装结构, 进行了力学分析, 最后总结了对我国长寿命沥青路面发展的思考, 主要结论如下:

1) 半刚性基层沥青路面耐久性存在缺陷, 级配碎石沥青路面难以适应高等级重载交通的要求, 倒装结构和全厚式沥青路面是比较合理的长寿命沥青路面结构形式的选择。

2) 倒装结构中, 加强沥青层或者半刚性层都会导致本层承担弯拉荷载增大, 另一层承担荷载减小, 但各层的应力应变等力学指标未必有相同的变化规律, 因为其量值不仅仅与弯拉荷载有关, 路面结构设计时需要注意此点。

3) 倒装结构中, 某层的拉应力或拉应变对本层的模量变化更为敏感, 对另一层模量变化的响应幅值相对较弱。

4) 倒装结构中, 调整某层的厚度, 其对于另一层力学响应量值的改变效果比调整模量更明显。

5) 我国倒装结构是对半刚性基层沥青路面的改善, 是半刚性基层结构与全厚式沥青路面结合的产物, 其在成本上相对于全厚式沥青路面优势, 但目前只是在理论上具有实现长寿命的可能性, 缺乏实践的证明。另外, 若想通过倒装结构实现长寿命, 必须加强对半刚性底基层的重视, 因为该层才是不可修复层。



## 参考文献

- [1] 宋波. 既有沥青路面结构评价与延寿设计方法研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京工业大学, 2019.
- [2] 袁宏伟. 沥青路面典型基层材料和结构性能试验与工程对比研究[D]: [博士学位论文]. 西安: 长安大学, 2010.
- [3] 魏道新. 半刚性基层沥青路面损坏模式与结构优化研究[D]: [博士学位论文]. 西安: 长安大学, 2010.
- [4] 王修山. 级配碎石基层沥青路面材料与结构特性研究[D]: [博士学位论文]. 西安: 长安大学, 2010.
- [5] 林有贵, 罗竞. 广西沥青路面典型结构的研究[J]. 广西交通科技, 2000(S1): 15-18.
- [6] 张吉庆. 路用粒料类材料安定行为及路面结构安定性分析研究[D]: [博士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2012.
- [7] 谢远勇. 基于有限元法的级配碎石基层沥青路面疲劳寿命预估[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2015.
- [8] 北拉里丁·阿力木, 刘豪斌. 柔性基层沥青路面结构研究综述[J]. 智能城市, 2018, 4(7): 118-119.
- [9] 蒋智禹. 倒装式沥青路面结构的力学性能研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2012.
- [10] 金江. 半刚性基层沥青路面的倒装结构综述[J]. 北京工业大学学报, 2003, 29(4): 465-467.
- [11] 刘景莉. 高速公路级配碎石基层沥青路面结构性能研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 河北工业大学, 2012.
- [12] 刘福明. 长寿命沥青路面损伤行为及其结构寿命合理匹配研究[D]: [博士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2010.
- [13] American Association of State Highway and Transportation Officials (2008) Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide: A Manual of Practice. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington DC.
- [14] 聂忆华. 全柔式长寿命沥青路面(FF-LLAP)结构及其设计方法研究[D]: [博士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2008.
- [15] Harmelink, D. and Aschenbrener, T. (2003) Extent of Top-Down Cracking in Colorado. Colorado Department of Transportation Research Branch, Denver.
- [16] 张永德. 广西地区全厚式沥青路面材料与力学性能研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2008.
- [17] 中交路桥技术有限公司. JTG D50-2017. 公路沥青路面设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2017.