

# 路基工作区的确定方法研究

黄琴龙, 凌建明

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

**摘要:** 通过应用 BISAR 软件, 详细比较路基工作区深度的确定结果与原路基教材上的方法, 全面分析了道路铺面结构的刚度效应、道路路基的刚度效应、车辆荷载的效应对路基工作区深度的影响。通过分析, 发现原工作区深度确定方法中关于铺面结构层厚度当量换算方法存在不当之处, 以及按车辆荷载附加应力与道路自重应力之比的应力比来确定路基工作区深度将带来的某些不合理之处, 提出以车辆荷载附加应力与路基土单轴压缩强度之比的应力比作为衡量路基工作区深度的改进建议。

**关键词:** 路基; 路基工作区; 路床压实区; 确定方法; 道路  
**中图分类号:** U 416.1 **文献标识码:** A

## Methodology Study on Defining Subgrade's Working Area

HUANG Qinlong, LING Jianming

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Based on BISAR software, a comparative study was made of the subgrade working area depth. A full analysis was made of the effects of pavement structure rigidity, subgrade rigidity and vehicle load on the subgrade working area depth. A mistake in converting the pavement structure layers' thickness into equivalent subgrade thickness in original subgrade textbook was disclosed, which may lead to some illogical results by using the ratio of vehicle load adding stress to road deadweight stress to define the subgrade working area. Finally, this paper presents a proposal to replace the road deadweight stress with soil terminal strength in defining subgrade working area.

**Key words:** subgrade; subgrade working area; roadbed compacting area; defining method; road

发展, 同时, 道路过早发生破坏的案例也屡见不鲜。道路的路基和路面共同承担着车辆荷载的反复作用, 路面上的病害不仅与路面结构性能有关, 还与路基的质量优劣紧密相关。由于路基路面材料的弹塑性特征, 材料受到的荷载应力越低, 其本构关系越接近于弹性状态。道路结构设计的根本目的就是通过合理的结构组合设计来控制道路结构的应力水平, 使路基路面材料尽可能处于弹性状态, 从而将路基变形控制在较小范围内。

车辆荷载在路基路面不同深度产生的附加应力  $\sigma_z$  随深度的增加而迅速减小, 靠近上部的土基层位受到的附加应力水平较大, 易产生过量的累积塑性变形。该部位就成为控制整个路基累积塑性变形的关键层位, 行业内所谓的路基工作区和路床压实区就是指这一区域。

路基工作区深度按现行的教材定义<sup>[1]</sup>: 从车轮荷载引起的均质路基附加应力小于路基土自重应力比值在 0.1~0.2 之间的层位。路床压实区是指路床部分对压实度要求很高的区域。然而, 我国行业内技术人员对路基工作区的概念以及路床压实区的由来并不十分清楚, 通常只是按规范规定的不同深度对应的压实度要求机械地控制, 以及大略知道轴载越大、路基工作区深度越深的趋势, 具体量值大多并不清楚。《公路路基设计规范》(JTG D30—2004)<sup>[2]</sup>对路床压实区范围较老版本作了调整, 将零填路基和挖方路堑压实度控制厚度由原来的 30 cm 扩大到 80 cm。但条文说明也只是简单说为了控制路基差异变形, 并未提及路基工作区深度这一概念。

国内外对于“路基工作区和路床压实区”的研究和讨论也不多。鲁东大学交通学院的郭兰英<sup>[3]</sup>在《车辆超载对路基路面强度和刚度的影响分析》一文中提到, 在超载情况下, 路基工作区将相应加深, 但未进一步量化分析; 扬州大学水利学院的肖鹏<sup>[4]</sup>在《道

近年来, 我国道路建设规模和里程得到了迅猛

收稿日期: 2009-12-11

第一作者: 黄琴龙(1970—), 男, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为道路路基和路面。E-mail: HQL04@sohu.com

路路基工作区与路基路面结构分析》一文中,对公路和城市道路的不同代表车辆荷载作用下的路基工作区深度作了计算,并将路面结构层换算成当量路基厚度后,提出加固区的概念,但面层结构当量换算时均按柔性基层考虑,不够精确,另对压实区的确定和加固措施过于笼统;陆庆臻等<sup>[5]</sup>在《对低填方路基地基表层处理深度的探讨》一文中,对路基工作区的确定作了进一步讨论,并在面层结构当量换算时,考虑了半刚性结构层的刚度效应,并讨论了地表层的不同处置措施。

可见,业内对一般道路路基工作区的概念还不够清楚,以致于压实区厚度的修正仍以主观经验为主,也发现原有确定方法有明显不合理之处.笔者利用 BISAR 软件,对路基工作区深度的确定结果与原教材上的方法详细比较和深入分析,同时考虑铺面结构的刚度效应、路基的刚度效应、车辆荷载的效应等对其的影响。

### 1 铺面结构效应下基于应力的路基工作区深度确定

在方左英编写的《路基工程》教材中,对路基工作区深度的确定方法是,先按无铺面情况,由式(1)计算车轮荷载对均质路基产生的附加应力,然后确定路基工作区深度  $Z_a$ . 该方法仅与路基土密度有关,未考虑路基土本身的模量影响。

$$Z_a = \sqrt[3]{3np/2\pi\gamma}$$

(1)

然后对铺面结构按式(2)换算当量厚度

$$Z_e = h_1 \sqrt[2.5]{E_1/E_0}$$

(2)

式中: $Z_a$  为路基工作区深度 m; $p$  为车轮荷载 kN; $\gamma$  为土的重度,  $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $n$  为自重应力与附加应力之比。

选取典型的沥青路面结构和材料参数(如表 1 所示),在标准轴载作用下,采用多层弹性层状体系理论分析荷载应力,最终确定路基工作区深度. 荷载应力分析和路基工作区深度确定方法分别采用原教材方法和壳牌公司的 BISAR 软件,最后对计算结果详细比较和深入分析。

路面、路基材料的重度均按  $18 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$  计。  
按教材方法,取  $n = 10$ ,  $Z_a = 2.37 \text{ m}$ ,  $Z_e = 2.81 \text{ m}$ . 因为  $Z_e > Z_a$ ,说明土基部分未进入路基工作区. 而按 BISAR 计算,在该铺面结构下,标准轴载作用下轮迹中心不同深度的附加应力如表 2 所示,工作区

底面已深入到土基 1.3 m 深处(距路表面 1.88 m)。

表 1 路基路面结构组合与材料参数

Tab.1 Pavement structure's combination and material parameters

结构层材料类型	厚度/cm	回弹模量/MPa	泊松比
沥青混凝土面层	8	1 200	0.30
石灰粉煤灰碎石基层	35	1 600	0.25
砾石砂垫层	15	200	0.30
土基		20	0.35

表 2 BISAR 计算的不同深度处车辆轴载附加应力

Tab.2 Additional stress of vehicles load under different depths calculated by BISAR

距路表深度/cm	荷载附加应力/kPa	路面、路基自重应力/kPa	$n$
58	9.2	10.44	1.13
68	8.7	12.24	1.41
78	8.0	14.04	1.76
88	7.3	15.84	2.17
98	6.6	17.64	2.67
108	6.1	19.44	3.19
118	5.6	21.24	3.79
128	5.2	23.04	4.43
138	4.8	24.84	5.18
148	4.4	26.64	6.05
158	4.1	28.44	6.93
168	3.8	30.24	7.96
178	3.6	32.04	8.90
188	3.4	33.84	9.95
198	3.1	35.64	11.50

若车轮荷载直接作用在纯均质路基上,用 BISAR 软件再次计算其应力分布. 与有铺面的情况对比如图 1 所示. 深度达到 2.38m 时,对应的应力为 4.15 kPa,与该深度处自重应力的 10% (4.28 kPa) 非常接近. 该深度与原教材方法得到的结果 (2.37 m) 几乎完全相同. 说明对纯土基中的应力计算,原教材方法与软件得到的结果是一致的. 但对铺面结构的荷载扩散效应的计算(当量厚度)——根据 BISAR 软件应力分析得到的结果为  $2.38 - 1.88 = 0.50 \text{ m}$ ,而按教材得到的结果为 2.81 m,两者相差 5 倍多. 经分析,发现原教材中对路面结构的当量厚度换算方法是以路表弯沉等效为原则的,而非以竖向附加应力等效为原则. 因此,铺面结构下的路基工作区深度不可按教材中的方法反算确定,应以带具体铺面结构的路基应力分析结果直接确定。

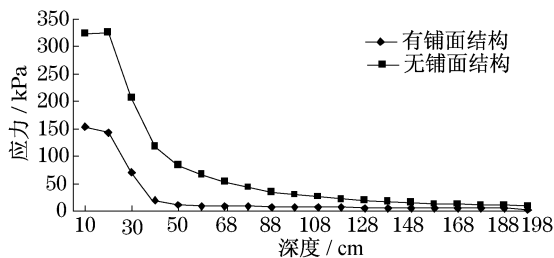


图 1 由 BISAR 算得的路表不同深度处的车轮荷载附加应力  
Fig.1 Additional stress of loads under different depths from road surface calculated by BISAR under the roads paved or unpaved respectively

2 路床压实区

若路基工作区深度超过路面结构厚度,则有一部分落在路床. 由于该部分土基处于车轮荷载的影响区内,为了确保土基部分的弹性变形和塑性累积变形小一些,要求该部位土基具有较高的回弹模量和较强的抗塑性累积变形能力. 而通过对路基填土的大量试验研究,发现在其他条件(湿度、土的类型、荷载)不变的情况下,土的密实度越高,回弹模量和抗塑性累积变形能力也越强. 因此,为保证道路的整体质量,通常对该部分路基土的密度有特殊的要求. 如现行《公路路基设计规范》(JTG D30—2004)第 3.2.1 条,对二级以上公路(包括二级公路)的填方路基和挖方路基,均要求在路面底面以下 0.8 m 范围内压实度达到 95% 以上. 而老规范(JTJ 013—95)<sup>[6]</sup>则对二级以上公路挖方路基的压实区仅取 0.3 m. 可见,新规范对挖方路基的压实区适当扩大到同填方路基,但仍对三、四级公路的挖方路基未调整.

3 不同等级公路的路基工作区

为研究不同等级公路的路基工作区深度变化规律,参照 1998 年上海市市政工程研究院许先琴<sup>[7]</sup>发表的《上海市沥青路面典型结构组合与厚度的研究》一文中的成果,选取不同公路等级的沥青路面结构组合(见表 3),路面结构层材料参数同表 1. 因土基模量不同,路基工作区深度也不同,故采用 BISAR 软件,分别按 10, 20, 30, 40, 50, 60 MPa 的土基模量,对不同等级公路的路基工作区深度(路床顶面以下)进行理论分析. 计算结果如表 4 和图 2 所示.

从表 4 和图 2 分析结果可以看出,不同等级公路在不同土基模量下的路基工作区深度(路床顶面以下)大致在 0.5~1.7 m 之间变化. 在同一土基模

量下,公路等级越高,路基工作区深度越浅. 原因是高等级公路的路面结构整体刚度较大,路面的应力扩散能力也较强,从而传到路基部分的附加应力也较小,导致路基工作区底面的临界深度变浅. 但若公路等级不变(如一级公路),土基模量由弱变强,从 10 MPa 增强到 60 MPa,路基工作区底面的临界深度由较浅的 0.65 m 变到较深的 1.39 m. 说明随着土基模量的增强,路基部分受到的车辆轴载附加应力也相应增大. 由此得到结论:其他条件均不变,仅路基模量由较低的 10 MPa 增强到较高的 60 MPa,路基压实控制区厚度反而由较薄的 0.69 m 变到较厚的 1.39 m. 这个结果似乎有悖于常理.

表 3 不同等级公路的沥青路面结构  
Tab.3 Asphalt pavement structures of different classes of roads

公路等级	结构组合(沥青混凝土+二灰碎石+砾石砂)
三级	9+35+15
二级	12+40+15
一级	12+45+15
高速	15+45+15

表 4 不同等级公路在不同土基模量下的路基工作区深度  
Tab.4 Depths of subgrade work area under different classes and subgrade modules

土基模量/MPa	三级公路	二级公路	一级公路	高速公路
10	0.99	0.76	0.65	0.55
20	1.26	1.06	0.94	0.86
30	1.44	1.23	1.11	1.04
40	1.52	1.35	1.24	1.17
50	1.59	1.43	1.32	1.26
60	1.66	1.50	1.39	1.34

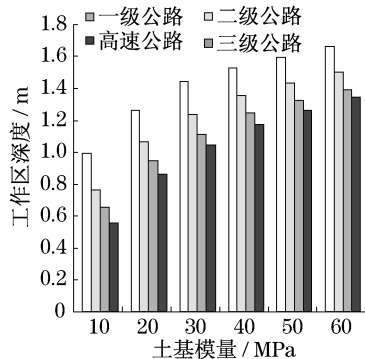


图 2 不同等级公路在不同土基模量下的路基工作区深度  
Fig.2 Depths of subgrade work area under different classes and subgrade module (from the top of roadbed)

4 重载交通下的路基工作区

随着我国经济的快速发展,道路交通量增长迅猛,同时,车辆荷载的重型化、载货汽车超载现象也

日趋严重,成为路面结构过早损坏的一个主要肇因.重交通不仅对路面结构提出了更高的要求,且在路基中产生了较大的行车荷载附加应力,其路基工作区深度和路床压实区与普通荷载下的情形相比定有显著的差异.考虑重载交通的荷载参数如表 5 所示.

表 5 不同轴载的接触应力及作用面积  
Tab.5 Stress and contact area of different loads

荷载参数	轴载/kN							
	100	110	120	130	140	160	180	200
轮胎压力/MPa	0.70	0.75	0.80	0.83	0.85	0.90	0.95	1.00
接触压力/MPa	0.70	0.74	0.77	0.79	0.81	0.85	0.89	0.92
当量圆半径/cm	10.65	10.88	11.17	11.45	11.73	12.26	12.65	13.04

以前述的二级公路路面结构和 20 MPa 的路基模量为例,分析不同轴载下的路基工作区,分析结果如表 6、图 3 所示.结果显示,若其他条件均不变,路基工作区(路床顶面以下)的深度随着路表的车辆轴载的增加而增加,且几乎呈直线线性增加,深度大约在 0.8~2.0 m 之间变动.

表 6 不同等级公路下不同轴载作用下的路基工作区深度  
Tab.6 Depths of subgrade work area under different classes of roads and loads

公路等级	轴载/kN							
	100	110	120	130	140	160	180	200
三级	1.26	1.35	1.43	1.50	1.57	1.70	1.82	1.93
二级	1.06	1.14	1.22	1.29	1.36	1.49	1.61	1.72
一级	0.94	1.12	1.19	1.26	1.33	1.45	1.57	1.68
高速	0.86	0.95	1.02	1.09	1.16	1.29	1.40	1.51

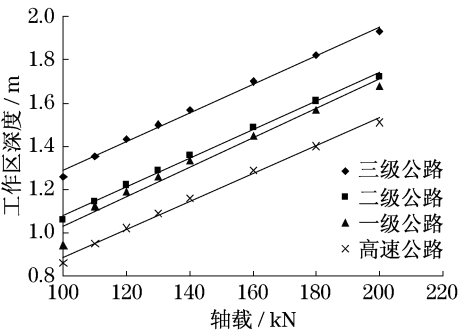


图 3 不同等级公路在不同轴载作用下的路基工作区深度趋势  
Fig.3 Tendency of subgrade work area depth under different classes of roads and loads

5 原方法的合理性评价和改进建议

通过以上分析发现,按车辆荷载在路基中的附

加应力与道路自重应力的比值来确定路基工作区深度的方法,工程意义不够明确.主要是因为该应力比在计算填方路堤引起的软土地基固结沉降时,确定压缩层计算厚度是有效的,相应的路基土室内固结 $e-p$ (孔隙比—荷载)曲线,也是基于恒定偏应力与恒定围压的条件得到的,而影响路基工作区深度的车辆荷载是重复作用的,车辆荷载作用下产生的累积塑性变形与恒载作用下的固结变形,两者的理论模型并不相同.说明用该应力比来控制车辆荷载作用下产生的累积塑性变形是不合适的,甚至会得出一些互相矛盾的结果,如路基条件越好(模量越高)、路基压实控制区越厚的怪现象.基于大量路基土的重复应力—应变试验结果,发现在应力级位(施加应力与静抗压强度之比)较小(0.1)的情况下,总应变和回弹应变均稳定在较小的范围内.建议采用附加应力与静抗压强度的比值作为路基工作区深度的确定依据,应力比值仍取 0.1.

6 结论

- (1) 纯土基中的应力计算,原教材方法与 BISAR 软件得到的结果是一致的;但对铺面结构的荷载扩散效应的计算(当量厚度),则结果相差甚远.教材中关于铺面结构的当量厚度换算公式是不适用的,应以铺面结构下的路基应力分析结果直接确定路基工作区深度.
- (2) 不同等级公路在不同土基模量下的路基工作区深度(路床顶面以下)大致在 0.5~1.7 m 之间变化.在同一土基模量下,公路等级越高,路基工作区深度越浅.
- (3) 按车辆荷载在路基中产生的附加应力与道

路自重应力的比值来确定路基工作区深度,若其他条件均不变,一级公路路基模量由较低的 10 MPa 增强到较高的 60 MPa,得到的路基压实控制区厚度反而由较薄的 0.65 m 变到较厚的 1.39 m. 说明该方法存在明显的不合理之处.

(4) 基于控制车辆荷载作用下产生的路基累积塑性变形的根本目的,建议采用附加应力与静抗压强度的比值作为路基工作区深度的确定标准,该比值仍取 0.1.

#### 参考文献:

- [1] 方左英. 路基工程[M]. 北京:人民交通出版社,1987.  
FANG Zuoying. Subgrade engineering [M]. Beijing: China Communications Press,1987.
- [2] 中交第二公路勘察设计研究院. JTG D30—2004 公路路基设计规范[S]. 北京:人民交通出版社,2004.  
CCCC Second Highway consultants Co. Ltd. JTG D30—2004 Highway subgrade design standard [S]. Beijing: China Communications Press,2004.
- [3] 郭兰英. 车辆超载对路基路面强度和刚度的影响分析[J]. 路基

工程,2006,124(1):8.

GUO Lanying. Influence analyzes on subgrade and pavement strength and rigidity under overloaded vehicles[J]. Subgrade Project,2006,124(1):8.

- [4] 肖鹏. 道路路基工作区与路基路面结构分析[J]. 华东公路,1996,102(5):39.  
XIAO Peng. Analysis on roadbed work area and roadway structure[J]. East China Highway,1996,102(5):39.
- [5] 陆庆臻,李森. 对低填方路基地基表层处理深度的探讨[J]. 淮阴工学院学报,2008,17(3):50.  
LU Qingzhen, LI Sen. The discussion about the depth in processing surface layer of subsoil of lower filled subgrade[J]. Journal of Huaiyin Institute of Technology,2008,17(3):50.
- [6] 中交第二公路勘察设计研究院. JTJ 013—95 公路路基设计规范[S]. 北京:人民交通出版社,1996.  
CCCC Second Highway consultants Co. Ltd. JTJ 013—95 Highway Subgrade Design Standard [S]. Beijing: China Communications Press,1996.
- [7] 许先琴,卢铭伊,梁伟光,等. 上海市沥青路面典型结构组合与厚度的研究[J]. 上海市市政工程,1998,46(2):13.  
XU Xianqin, LU Mingyi, LIANG Weiguang, et al. Research of Shanghai asphalt pavement modular design combination and thickness[J]. Shanghai Municipal Engineering,1998,46(2):13.

(上接第 550 页)

#### 参考文献:

- [1] American Association of State Highway and Transportation Officials. AASHTO T166—2000 Standard test method for bulk specific gravity and density of non-absorptive compacted bituminous mixtures. Standard specifications for transportation materials and methods of sampling and testing[S]. Washington: AASHTO,2000.
- [2] 交通部公路科学研究所. JTJ 032—1994 公路沥青路面施工技术规范[S]. 北京:人民交通出版社,1994.  
Research Institute of Highway Ministry of Transport. JTJ032—1994 Standard technical specifications for construction of highway asphalt pavement[S]. Beijing: China Communications Press,1994
- [3] 交通部公路科学研究所. JTG F40—2004 公路沥青路面施工技术规范[S]. 北京:人民交通出版社,2004.  
Research Institute of Highway Ministry of Transport. JTGF40—2004 Standard technical specifications for construction of highway asphalt pavement[S]. Beijing: China Communications Press,2004.
- [4] 周卫峰,赵可,孟庆营,等. 测定沥青混合料最大理论相对密度的浸渍法[J]. 中国公路学报,2007,20(1):24.  
ZHOU Weifeng, ZHAO Ke, MENG Qingying, et al. Immersion

test method of maximum theoretical relative density of asphalt mixture[J]. China Journal of Highway and Transport,2007,20(1):24.

- [5] Kandhal P S, Khatri M A. Relating asphalt absorption to properties of asphalt cement and aggregate[C]//NCAT Report No. 92 - 2, Washington D C: The Annual Meeting of the Transportation Research Board,1992.
- [6] 交通部公路科学研究所. JTJ 052—2000 公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S]. 北京:人民交通出版社,2000.  
Research Institute of Highway Ministry of Transport. JTJ052—2000 Standard test methods of bitumen and bituminous mixtures for highway engineering [S]. Beijing: China Communications Press,2000.
- [7] American Society for Testing Material. D04Road and paving materials[S]. Washington D C: American Society for Testing and Materials,1997.
- [8] American Association of State Highway and Transportation Officials. AASHTO T209 Standard method of test for theoretical maximum specific gravity and density of hot-mix asphalt paving mixtures[S]. Washington D C: AASHTO,2005.
- [9] 韦金城,魏密. 沥青混和料最大理论密度确定方法研讨[J]. 重庆交通学院学报,2003,22(3):44.  
WEI Jincheng, WEI Mi. Research of the computing methods of the theoretical maximum density of bituminous mixtures [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University,2003,22(3):44.