

高速公路加宽工程路面结构应力及适应性研究

沈立森¹, 杨广庆¹, 高民欢², 陈君朝³

(1. 石家庄铁道大学 土木工程学院 河北 石家庄 050043; 2. 河北省高速公路管理局 河北 石家庄 050061;

3. 河北省高速公路京石改扩建筹建处 河北 保定 071051)

摘要: 公路改扩建是高速公路建设的重要课题。基于国内外研究现状,结合工程实际建立有限元模型,研究地基处理前后路面结构层附加应力响应,计算路面结构层的强度发挥率,确定应力控制层,制定差异沉降控制标准。主要结论为:路面底基层的强度发挥率最大,为路面应力控制层;通过改变复合地基桩体和格栅参数,同时考虑安全系数,得出差异沉降控制标准为0.5%。对应的处理措施为:桩体模量为10.0 GPa、桩体长度为15 m、桩体间距为2.0 m;格栅模量为1.0 GPa、格栅长度为7 m。

关键词: 改扩建;有限元;强度发挥率;应力控制层;差异沉降

中图分类号: U416.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-0373(2013)04-0077-06

0 引言

21世纪以来,高速公路的长期运营,使得大部分道路已达到设计年限,早期建设的高速公路已不能满足需求,需由原来双向四车道加宽成双向六车道甚至双向八车道,公路改扩建已成为高速公路建设的发展趋势。然而,加宽的高速公路在开放交通后,新老路基产生的过大差异沉降会使路面结构层产生附加拉应力,当附加拉应力大于路面结构层的容许应力时,将导致新老路面结合处产生裂缝,这势必会降低路面的承载能力,影响道路的通畅和运输^[1-2]。因此,高速公路加宽中如何防止路面开裂是一个亟待解决的问题。

杨建斌利用有限元法分析了沥青路面加宽时差异沉降引起的附加应力,通过调整路面参数探讨了路基加宽的设计方法^[3]。余常俊提出为了增加新老路面的连续性,需要在基层、下面层和中面层设置台阶,并就拼接台阶的施工工艺做了具体介绍^[4]。曾庆春等结合佛开高速公路改扩建工程,利用有限元法计算了加宽时新老路基差异沉降对路面结构层的附加应力,新老路基差异沉降对路面结构层产生的过大附加应力会使路面发生破坏^[5]。

采用有限元软件建立计算模型,分析地基处理前后,新老路堤表面工后沉降和横坡度变化规律;然后对路面结构层在不同工后沉降条件下的附加应力响应进行研究;最后通过改变新加宽路基基底的复合地基设计参数,对比各工况组合的路堤表面横坡度变化规律和路面结构层附加应力回应情况,从而制定合理的差异沉降控制标准。

1 工程概况

京港澳高速公路涿州(京冀界)—石家庄段运营20 a以来,交通量迅速增长,服务水平已趋于饱和。因此,扩建本段高速公路是十分必要的。依托京港澳高速公路涿州(京冀界)—石家庄段双向四车道对称加宽为双向八车道改扩建工程,选取某典型断面进行计算,路基填高为5.0 m,路面宽度为26 m,加宽至42 m,边坡斜率均为1:1.5。根据地质勘察资料,地面以下土层分别为4.5 m粉土,5.7 m淤泥质粉质黏土,

收稿日期:2013-06-20

作者简介:沈立森 男 1986年出生 硕士研究生

基金项目:河北省交通运输厅科技计划项目(Y-2011001)

11.3 m 粉质黏土。

2 计算模型

2.1 计算假定

(1) 路基纵向足够长,三维空间问题可转化为二维平面问题,按照平面应变问题处理。

(2) 老路基加宽后,新老路基间完全连续。

(3) 新老路面标高相同,不存在高差。

(4) 路面各结构层均为各向同性的弹性材料。

(5) 地基处理采用的 CFG 桩体和土工格栅为线弹性材料,采用摩擦单元模拟桩-土和格栅-土之间的相互作用。

2.2 几何模型

几何模型取对称半结构,地基宽度取 60 m,加宽前路面结构层厚度为 79 cm,加宽后路面结构层厚度为 85 cm。地基处理措施:采用复合地基桩网结构处理,桩体采用三角形布置,桩长 15.0 m,桩间距 2.0 m,桩径 0.4 m。处理范围:原有路基边坡开挖的最后一级台阶内缘至加宽后路基坡角处;填筑路基时在最下一级台阶和路床底部(位于地表以上 4.0 m 左右处)分别铺设一层土工格栅,格栅长度 8 m。

处理后模型横截面如图 1 所示,路面结构层简化示意图如图 2 所示。

2.3 计算参数

根据地勘资料及试验结果,计算参数如表 1 所示。

表 1 计算参数

土层	厚度/m	湿容重/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	模量/MPa	泊松比	黏聚力/kPa	内摩擦角/($^{\circ}$)
老路基土	5.0	20.0	12.0	0.32	30.0	27.0
粉土	4.5	20.0	2.8	0.3	10.0	21.0
淤泥质土	5.7	17.0	1.9	0.34	22.0	15.0
粉质粘土	11.3	19.0	3.1	0.3	12.0	18.0
新路基土	5.0	20.0	12.0	0.32	30.0	28.0
桩体	—	—	15 000	0.2	—	—
格栅	—	—	1 000	0.25	—	—

2.4 边界条件与网格控制划分

左边界和地基右边界 y 方向约束,上边界和路基右边界自由,下边界 y 和 z 方向约束。加宽路基处理后,计算模型的网格划分如图 3 所示。

2.5 求解计算

改扩建路基加宽工程分析是一个非线性计算过程。因此,计算方法可选用小变形小应变收敛准则,即首先假设第 i 步的荷载 F_i 和相应的位移 δ_{yi} 已知条件,然后将荷载增至第 $i+1$ 步,此时 $F_{i+1} = F_i + \Delta F$,进而求解相应位移 $\delta_{i+1} = \delta_i + \Delta \delta$,当 ΔF 足够小时,方程的解收敛^[6]。

2.6 路基加宽工后沉降规律

地基处理前后,新老路堤表面工后沉降曲线如图 4 所示。从图 4 可知,路堤表面工后沉降曲线大致呈

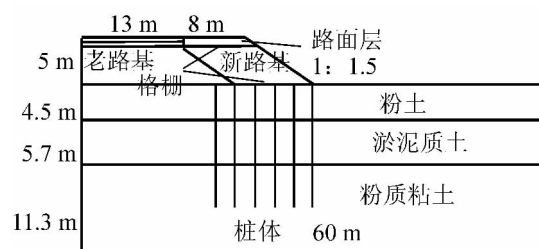


图 1 模型横断面



图 2 路面结构层示意图

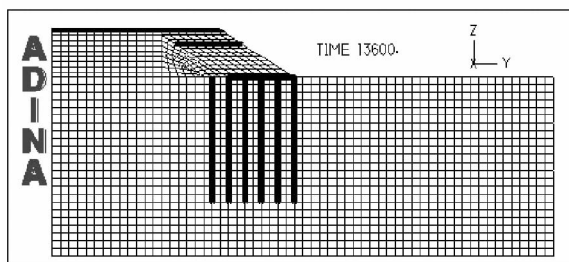


图3 网格划分图(地基处理后)

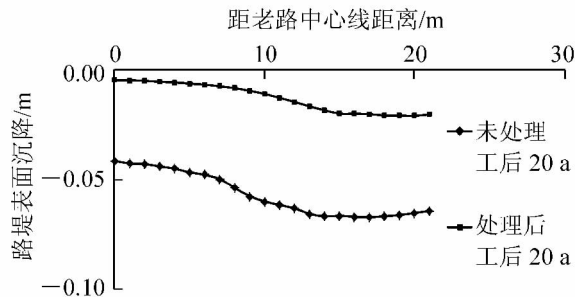


图4 新老路堤表面工后沉降

“勺”形,在新路肩附近达到最大值。未处理时 20 a 后的路堤表面沉降达到 6.7 cm。处理后沉降值减小至 2.2 cm,其原因在于地基经桩网结构处理后,大大减小了地基部分沉降,从而使得路堤表面的工后沉降随之减小。

2.7 路基加宽横坡度变化规律

对于高速公路改扩建工程,横坡度是判断路面是否开裂的重要指标。较大的横坡度虽有利于路面排水,但同时会使路面产生裂缝,结构发生破坏,严重影响行车安全。因此,必须对地基和新路基进行处理,减小路基的横坡度,保证行车安全。结合路基加宽工后沉降数据,得出地基处理前后工后 20 a 的横坡度,如表 2 所示。

表2 横坡度变化表 %

位置	工况	
	未处理工后 20 a	处理后工后 20 a
老路	0.38	0.25
新路	0.93	0.42
新老路	0.85	0.36

从表 2 中可看出,处理后,新老路基工后 20 a 的新路横坡度和新老路横坡度已明显减小,其减小程度分别为 55% 和 58%,但对于老路横坡度而言,处理前后的减小程度为 34%,三者减小程度最小。其因为老路基已固结完成,新路附加荷载对老路横坡度影响较小,而新路基未经固结过程,所以,新路基经地基处理后,新路堤横坡度的减小程度大于老路堤。

3 路面结构层附加应力响应分析

为研究路面结构层对工后沉降的附加应力响应,需判断路面附加应力是否大于路面结构层的容许应力,只有当路面附加应力小于容许应力时,才能保证路面结构层安全。

3.1 路面结构层容许应力计算

通过对路面结构层进行力学分析,得出各结构层的容许应力如表 3 所示。

表3 路面结构层容许应力

路面结构层	容许应力 σ /MPa
改性沥青玛蹄脂碎石(SMA-13)	0.47
中粒式改性沥青混凝土(AC-20)	0.29
粗粒式沥青混凝土(AC-25)	0.23
密级配沥青稳定碎石(ATB-25)	0.23
水泥粉煤灰碎石	0.18
低剂量水泥稳定碎石	0.11

3.2 处理前路面结构层附加应力响应分析

由于新老路基固结沉降程度不同,新路基在填筑完成后所产生的沉降量大于老路基沉降量。因此,新路基填筑完成后,新路面会因工后差异沉降的存在而产生较大的附加应力,在车辆荷载的作用下,附加应力会更大。新路竣工运营 20 a 后,路堤表面最大工后沉降为 6.7 cm,在此沉降变形影响下,路面各结构层的拉应力云图如图 5 所示。

从图 5 中可以看出,新老路面结构层在差异沉降的作用下表现为拉应力,路面结构层的最小拉应力位于老路面表层距老路中心 1.0 m 左右处,该处的路面材料为改性沥青玛蹄脂碎石(SMA-13),最小拉应力值约为 0.086 MPa;最大拉应力位置距老路中心 14.2 m 处(新老路面结合处附近),该处为新路面基层,对应的路面材料为水泥粉煤灰碎石底基层,最大拉应力为 1.369 MPa。

因新老路面层的材料和容许应力各不相同,所以,不能仅通过路面层的拉应力一个角度进行评价,为此,提出了强度发挥率和应力控制层^[7]两个概念。强度发挥率可反映路面结构层的应力发挥程度或强度利用率,即路面结构附加应力与容许应力的比值。最大强度发挥率所在的路面结构层则被称为应力控制层。由此得出各路面结构层强度发挥率曲线,如图 6 所示。从图 6 中可以看出,大部分路面结构层强度发挥率大于 1.0,即路面结构层附加应力均超出容许应力,仅在距老路中心 5 m 范围内的改性沥青玛蹄脂碎石(SMA-13)强度发挥率小于 1.0。其中底基层发挥率最大,对应的路面材料为低剂量水泥稳定碎石,即为应力控制层。

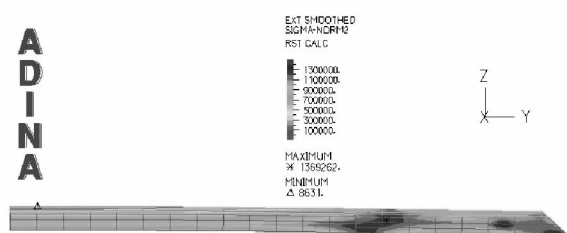


图 5 路面结构层拉应力云图

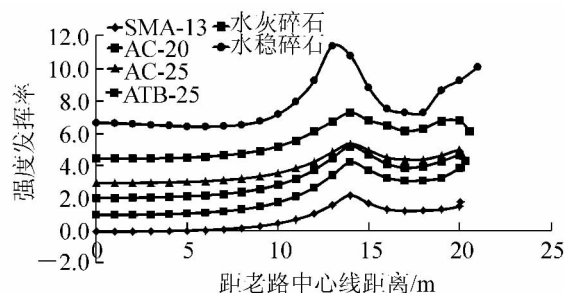


图 6 各路面结构层强度发挥率

3.3 处理后路面结构层附加应力回应分析

地基处理后,新路竣工运营 20 a 后,路堤表面最大工后沉降为 2.2 cm,在此沉降变形作用下,路面各结构层的拉应力云图,如图 7 所示。

由图 7 可看出,处理后的新老路面结构层在差异沉降的作用下仍表现为拉应力,但附加应力值已明显减小,最小拉应力位于老路中心附近,该处的结构层材料为改性沥青玛蹄脂碎石(SMA-13),最小拉应力值为 0.023 MPa,比处理前减小了 73%。最大拉应力位置距老路中心 13.0 m 处(新老路面结合处附近),该处为新路面面层,对应的路面材料为粗粒式沥青混凝土(AC-25),最大拉应力值为 0.150 MPa,附加应力比处理前减小了 89%。

处理后各路面结构层强度发挥率最大值曲线,如图 8 所示。从图 8 可看出,处理后,路面结构层的强度发挥率均小于 1.0,满足路面结构容许应力要求,虽然路面结构层的最大应力层位于新路面面层,但最大的强度发挥率所在位置为路面底基层,对应的路面材料为低剂量水泥稳定碎石,即为应力控制层。



图 7 桩网复合地基处理后路面结构层附加应力云图

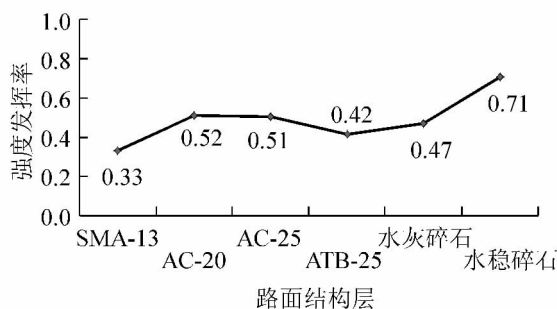


图 8 处理后路面结构层强度发挥率

4 工后差异沉降控制标准分析

在路面结构层不发生开裂的前提下,采取经济有效的地基处理方案,不仅能保障道路的通行安全,而

且能降低工程造价,节约成本,这就需要合理的新老路基工后差异沉降控制标准。首先,逐次改变桩体参数,即桩体模量、桩体长度和桩体间距;确定桩体参数后,再逐次改变格栅参数,即格栅模量和格栅长度,对比不同工况组合的横坡度和强度发挥率变化规律,最终确定合理的差异沉降控制标准和处理方案。

4.1 不同桩体工况下指标对比分析

桩体模量分别选取 5.0 GPa、10.0 GPa、15.0 GPa、20.0 GPa 和 25.0 GPa,桩体长度分别选取 10 m、15 m、20 m 和 25 m,桩体间距分别选取 1.6 m、2.0 m、2.5 m、3.3 m 和 5.0 m,不同工况组合的横坡度和强度发挥率曲线,如图 9~图 11 所示。

由图 9~图 11 可知,当桩体模量 10.0 GPa,桩体长度 15 m,桩体间距为 2.0 m 时,强度发挥率为 0.9,对应的横坡度为 0.50%,此时,各路面结构层的附加应力均小于容许应力,满足要求。

4.2 不同格栅工况下指标对比分析

桩体参数确定后,逐次改变格栅参数,格栅模量分别选取 0.1 GPa、0.5 GPa、1.0 GPa、1.5 GPa 和 2.0 GPa,格栅长度分别选取 4 m、5 m、6 m、7 m 和 8 m,不同工况组合的横坡度和路面结构层强度发挥率曲线,如图 12 和图 13 所示。

由图 12、图 13 可知,当选取格栅模量 1.0 GPa,格栅长

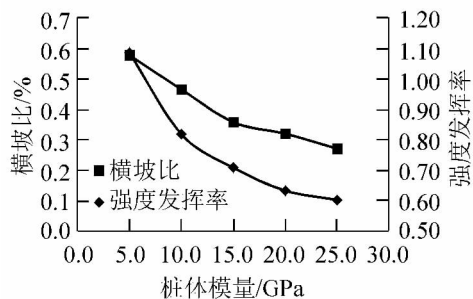


图9 不同桩体模量指标对比

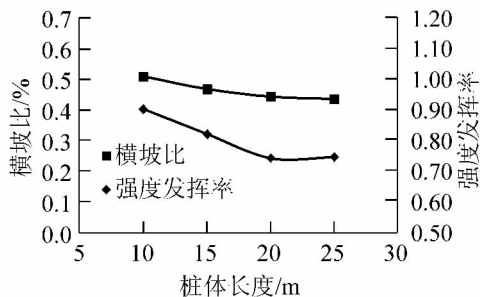


图10 不同桩体长度指标对比

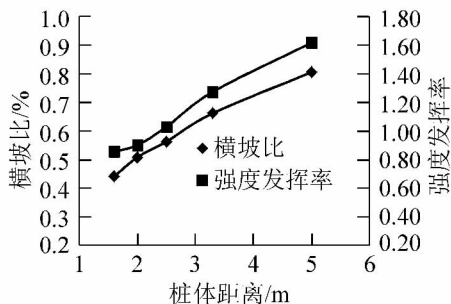


图11 不同桩体间距指标对比

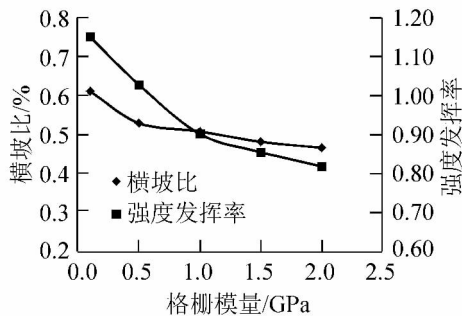


图12 不同格栅模量指标对比

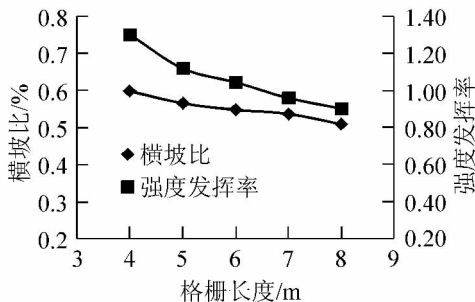


图13 不同格栅长度指标对比

度 7 m 时,强度发挥率为 0.96,横坡度为 0.54%,由此可知,格栅的参数对强度发挥率和横坡度的影响较小。各路面结构层附加应力均小于容许应力,满足要求。

综合以上工况组合并考虑新老路基和路面结构层的安全系数,将该新老路基的差异沉降控制标准值减小至 0.5%,此时对应的处理方案如表 4 所示。

表4 处理措施

处理措施	弹性模量/GPa	长度/m	间距/m
桩体	10.0	15	2.0
格栅	1.0	7	—

5 结论

结合京港澳高速公路涿州(京冀界)—石家庄段改扩建工程,分析了地基处理前后,新老路堤表面工后沉降和横坡度的变化规律,研究了工后沉降作用下的路面结构层附加应力响应,计算了路面结构层的强度发挥率,并确定了应力控制层,制定了合理的差异沉降控制标准和经济有效的地基处理措施。主要结论如下:

(1) 路堤表面工后沉降曲线大致呈“勺”形,处理前,工后沉降最大值为 6.7 cm,地基处理后,工后沉降值减小至 2.2 cm。原因在于地基处理使地表沉降明显减小,路堤表面工后沉降也随之减小。

(2) 地基处理前后,新老路面结构层均表现为拉应力,且最大强度发挥率所在位置为路面底基层,对应的路面材料为低剂量水泥稳定碎石,即为应力控制层。

(3) 通过改变桩体和格栅参数,组合不同工况并考虑安全系数,得出差异沉降控制标准为 0.5%,其对应的地基处理方案为桩体模量为 10.0 GPa、桩体长度为 15 m、桩体间距为 2.0 m;格栅模量为 1.0 GPa、格栅长度为 7 m。

参 考 文 献

- [1] 尉红彬,李韶华.重载汽车与路面的动力相互作用研究[J].石家庄铁道学院学报:自然科学版,2009,22(4):36-39.
- [2] 李金娟.高等级公路改扩建路基加宽技术分析[J].石家庄铁道学院学报,2006,19(增):117-119.
- [3] 杨建斌.加宽道路路面开裂的有限元分析[J].广西交通科技,2009,28(6):102-103.
- [4] 余常俊.高速公路加宽工程新老路结合部施工技术[J].公路,2011,10(3):105-109.
- [5] 曾庆春,廖建春.基于路面应力分析高速公路加宽工程差异沉降控制标准[J].广东交通职业技术学院学报,2010,5(1):1-5.
- [6] 闫茜.土工格室柔性结构体系加筋路堤仿真模拟计算分析[D].石家庄:石家庄铁道大学,2010.
- [7] 范跃武.连霍高速改扩建路基路面协调性技术研究[D].南京:东南大学,2009.

Study on Structural Stress and Adaptability of Pavement in Highway Subgrade Widening Engineering

Shen Lisen¹, Yang Guangqing¹, Gao Minhuan², Chen Junchao³

- (1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;
- 2. Hebei Province Highway Administration, Shijiazhuang 050061, China;
- 3. Department of Preparatory Construction for Hebei Province Jingshi Reconstruction & Extension Expressway, Baoding 071051, China)

Abstract: Reconstruction and expansion is an important topic in highway construction. Based on the present situation in domestic and foreign research, the finite element model is established with practical engineering. The pavement structure stress response is researched before and after the treatment of foundations. The strength action rate of pavement layer is calculated and the stress control layer is determined. The control standards of differential settlement is formulated. The results show that the strength action rate of pavement subbase, stress control layer, is maximal. Considering the safety factor, the differential settlement control standard is 0.5%. The corresponding treatment measures are: the pile modulus is 10.0 GPa, the pile length is 15 m, the pile spacing is 2.0 m, the modulus of 1.0 GPa, and grating length is 7 m.

Key words: reconstruction and expansion; finite element; strength action rate; stress control; differential settlement

(责任编辑 车轩玉)