

# 不同荷载作用下半刚性基层弯沉验收标准研究

郑全

(宿迁市公路管理处, 江苏 宿迁 223800)

**摘要:** 针对中国沥青路面超载现象较多, 而设计规范中轴载换算公式不适用于超载情况, 半刚性基层弯沉检测标准值需进行修正, 计算半刚性(底)基层弯沉验收标准值时采用的设计回弹模量与实际工程中半刚性基层材料模量相差较大的问题, 通过温度-龄期公式计算出半刚性(底)基层的实际回弹模量, 基于层状弹性体系理论, 采用 BISAR 软件计算出不同轴载下半刚性(底)基层顶面的弯沉检测标准值。

**关键词:** 公路; 半刚性基层; 弯沉; 荷载作用; 验收标准

中图分类号: U416.2

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2017)03-0084-03

中国公路运输的高效与快速, 使运输车辆超载现象变得十分普遍, 轴载增加较为严重。JTG D50-2006《公路沥青路面设计规范》以单轴 100 kN 为标准轴载, 当荷载满足单轴轴载 $\leq 130$  kN 或双轴轴载 $\leq 220$  kN 时可根据相关公式换算为标准轴载来计算沥青路面的累计当量轴载次数, 但根据交通量及荷载调查结果, 当后轴从 100 kN 增加到 180 kN 以上、轮胎充气压力从 0.7 MPa 增加到 0.9 MPa 以上时, JTG D50-2006《公路沥青路面设计规范》中的轴载换算公式不再适用。近几年随着宿迁市经济的飞速发展, 宿迁市境内的国省干线公路运输超载现象日益严重, 据不完全统计, 52% 的货车存在超载, 这对道路使用寿命及性能造成很大不利影响。另外, 半刚性(底)基层施工完成后需对其进行弯沉验收, 而轴载不同时, 基层顶面弯沉验收标准值会随之改变。综合以上考虑, 对不同荷载作用下基层弯沉验收标准值进行研究有其必要性和重要性。

相关研究表明, 在一定温度范围内半刚性基层材料模量随着龄期的增长而增长, 不同材料的模量增长规律有所区别。根据 JTG D50-2006《公路沥青路面设计规范》, 基层弯沉验收标准值通过采用材料的设计模量经相关公式计算而来, 但在实际半刚性基层养生条件下, 半刚性基层弯沉验收检测时的材料实际龄期模量与材料设计模量相差较大, 以采用材料设计模量计算得到的弯沉值作为验收半刚性基层施工质量的依据, 在一定程度上并不科学, 不能实现对工程质量的控制。该文选取宿迁市境内的典型半刚性基层沥青路面结构, 基于沥青路面的层状弹性理论, 利用 BISAR 软件, 针对不同等级荷载计

算半刚性(底)基层的施工弯沉验收标准值, 为实体工程弯沉验收提供参考。

## 1 半刚性基层弯沉变化规律及计算理论

目前, 国内外沥青路面设计方法主要有经验法和力学-经验法两种。中国采用力学-经验法, 该方法根据应用固体力学理论对沥青路面结构进行力学计算分析, 结合室内试验结果、试验路检测结果和交通量观测结果建立沥青路面结构抗力标准, 通过比较力学响应量与结构抗力进行沥青路面结构设计。设计时通常将沥青路面结构层假设成各结构层之间是连续且各向同性的, 同时对层状弹性体系理论的研究较多。该文基于层状弹性体系理论, 采用 BISAR 软件对半刚性基层顶面弯沉进行计算, 分析不同轴载条件对半刚性基层顶面弯沉的影响。

## 2 半刚性基层材料强度及模量随龄期的变化

半刚性基层材料主要有水泥稳定碎石、二灰碎石、石灰土等, 各材料的强度形成机理基本相同, 都是通过无机结合料的化学反应及结晶过程形成具有较高强度的无机结合料体。但由于无机结合料受外界条件(种类、含量、集料级配及含水量)的影响不同, 不同条件下半刚性基层材料的强度及模量随龄期的变化规律有所不同。

选取宿迁市内国省干线公路较为典型的半刚性基层即水泥稳定碎石对半刚性基层顶面弯沉进行研究。水泥稳定碎石混合料均在标准条件下养生, 养生温度为 $(20 \pm 2)$  °C, 湿度不小于 95%。试验结果见表 1~2 和图 1。

表1 不同龄期下水泥稳定碎石的无侧限抗压强度  $S_c$ 

龄期/d	无侧限抗压强度 $S_c$ /MPa	龄期/d	无侧限抗压强度 $S_c$ /MPa
3	2.8	28	4.6
7	3.8	60	5.5
14	4.3	90	5.7

表2 不同龄期下水泥稳定碎石的抗压回弹模量  $E_c$ 

龄期/d	抗压回弹模量 $E_c$ /MPa	龄期/d	抗压回弹模量 $E_c$ /MPa
3	1 572	28	3 067
7	2 071	60	3 854
14	2 435	90	4 246

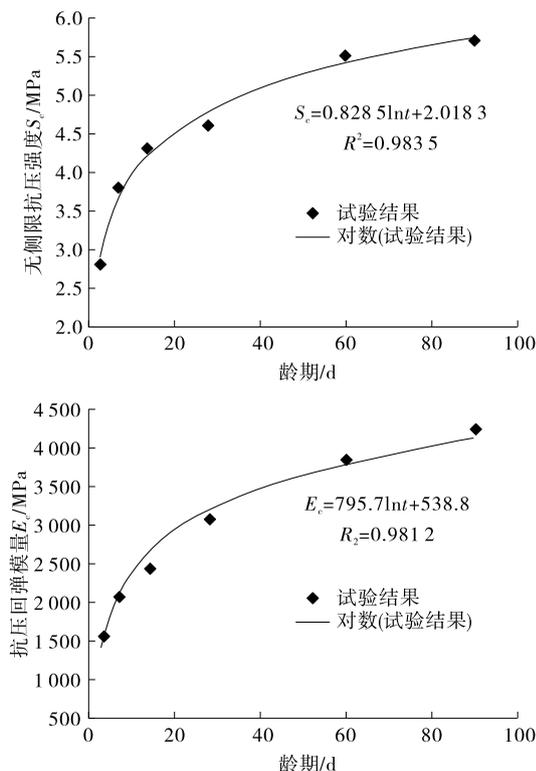


图1 水泥稳定碎石的无侧限抗压强度及抗压回弹模量随龄期的变化

从图1可看出:水泥稳定碎石的模量、抗压强度与养护龄期之间存在对数函数关系,相关性高达98%;随着养护龄期的增长,水泥稳定碎石的模量、抗压强度逐渐增长,但当龄期足够大时,模量增长趋势变得缓慢。由于水泥稳定碎石自身的特性,其模量增长是一个持续的过程,但不会无限制地增长,路面通车后,环境条件和行车荷载的耦合作用会抑制模量的增长。

### 3 半刚性基层模量折算

在进行沥青路面弯沉检验标准值计算时,半刚性基层材料模量采用设计龄期的模量,而上述半刚性基层材料模量对龄期的增长规律是室内标准养生条件下得到的,实际施工环境和室内养生条件不同,半刚性材料强度的形成、增长与外界环境有很大的相关性,自然养生条件下某一龄期的半刚性材料模量不同于同龄期室内标准养生条件下的模量。因此,需对自然养生条件下的半刚性基层模量进行折算,以较准确地反映半刚性基层材料在室内标准养生条件下的模量。

影响半刚性基层材料强度的因素较多,包括温度、湿度、时间等,若在基层施工结束后迅速进行养生,则基层的湿度和标准养生条件下的基层湿度相当,而水泥稳定碎石基层在其厚度范围内不存在温度坡降。湿度相同时,水泥稳定碎石的强度是温度和时间的函数,即对于同一湿度状态的试件,以不同温度和不同龄期所形成的强度总有可能等于标准养生条件下某一龄期的结果。文献[7]认为温度与龄期间存在较为密切的函数关系,并建立了式(1)所示温度—龄期换算公式,将自然养生条件下的龄期换算为标准养生条件下的龄期。

$$\frac{D_{20}}{D_T} = \left( \frac{T-4}{20-4} \right)^a \quad (1)$$

式中: $D_{20}$ 为标准养生温度20℃下的养生时间(d); $D_T$ 为自然养生温度 $T$ 下的养生时间(d); $a$ 为与 $T$ 有关的系数, $\lg a = 0.0593 + 0.00634T$ , $T = 1.21T_0 + 3.83$ ;  $T_0$ 为养生期间的平均温度, $T_0 \geq 10$ ℃,当 $T_0 < 10$ ℃时 $T$ 的结果应减去 $0.5(10 - T_0)$ 的修正系数。

根据式(1)可将半刚性基层材料在温度 $T$ 下的养生龄期换算成标准养生温度20℃下的养生龄期,并计算出半刚性基层材料的回弹模量。

### 4 半刚性基层顶面弯沉计算结果分析

#### 4.1 计算条件

通常水泥稳定碎石(底)基层顶面弯沉值测试龄期为14d,故测试(底)基层时采用14d养生龄期,养生期间平均温度 $T_0 = 27.5$ ℃。

宿迁市干线公路典型水泥稳定碎石基层沥青路面结构及材料参数见表3。根据层状弹性体系理论,采用BISAR软件计算不同轴载下水泥稳定碎石

(底)基层顶面弯沉。计算参数如下:荷载方式为双圆均布荷载,当量圆半径  $r=10.65$  cm,轮隙间距为  $1.5r$ ,两轮间距约为 32 cm;忽略水平荷载的影响,层间接触为不完全光滑接触。

表3 宿迁市典型沥青路面结构参数

结构层	厚度/cm	模量/MPa	泊松比
上面层(细沥青砼)	4	1 400	0.25
中面层(中沥青砼)	6	1 200	0.25
下面层(粗沥青砼)	8	1 000	0.25
基层(水泥稳定碎石)	38	—	0.25
底基层(水泥稳定碎石)	20	—	0.25
土基	—	50	0.35

#### 4.2 水泥稳定碎石模量折算

通过式(1)将自然养生条件下的养护龄期折算成标准室内养生温度下的养护龄期,再根据前述水泥稳定碎石混合料强度及模量与养护龄期的函数关系,计算自然养生条件下对应龄期水泥稳定碎石混合料的模量。水泥稳定碎石基层温度  $T=1.21 T_0+3.83=37.11$  °C,根据  $\lg a=0.059 3+0.006 34T$ ,计算出  $a=1.971$ 。根据式(1),当  $D_T=7$  d时,  $D_{20}=4.193 D_T=29$  d;当  $D_T=14$  d时,  $D_{20}=4.193 D_T=59$  d。

根据水泥稳定碎石混合料强度及模量随龄期的变化规律,计算出 14 d 龄期时水泥稳定碎石基层、底基层的回弹模量分别为 3 218.2、3 783.3 MPa。

#### 4.3 半刚性(底)基层顶面弯沉计算结果分析

弯沉是在一定荷载作用下路面结构层顶面的竖向变形,是反映路面结构层承载能力和施工质量好坏的最直观、最简单的评价指标。分别取轴载为 100、120、140、160、180 和 200 kN,利用 BISAR 软件计算不同轴载作用下水泥稳定碎石(底)基层顶面弯沉变化情况,结果见图 2。

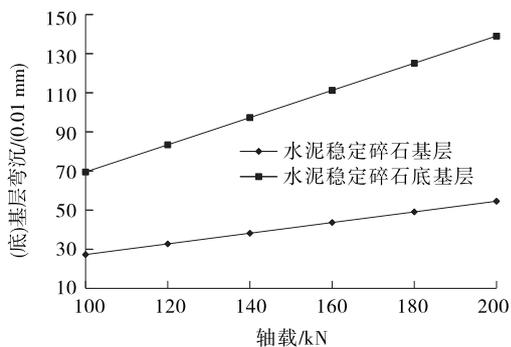


图2 半刚性基层顶面弯沉随轴载的变化

由图 2 可知:水泥稳定碎石(底)基层顶面弯沉随标准轴载的增大大致呈线性增长,当轴载由 100 kN 增加到 200 kN 时,水泥稳定碎石(底)基层顶面弯沉增加 1 倍多,说明轴载对水泥稳定碎石(底)基层顶面弯沉的影响较大。因此,在进行路面结构设计时,对于轴载的选取尤为重要,在不同等级轴载的作用下,基层顶面弯沉验收标准值不同,需采用不同的标准进行验收。在重载作用下沥青路面会产生较大弯沉变形,因而会产生较大层底弯拉应力,导致路面提前出现疲劳开裂,严重降低沥青路面的使用寿命,这也是沥青路面实际寿命与设计寿命相差较大的原因。可见,重载或超载作用对基层承载力是一个巨大考验,如果基层承载力难以满足行车荷载的需求,基层将发生损伤,在环境、荷载反复作用下,整个路面结构将发生结构性破坏,给行车带来安全隐患,经济上造成巨大损失。半刚性(底)基层弯沉测试采用的标准轴载和设计龄期条件往往与实际情况有较大差异,有必要对轴载和龄期进行折算,计算出更符合实际条件的(底)基层弯沉值,为半刚性(底)基层施工提供理论指导。

## 5 结论

(1) 在一定温度范围内,随着养护龄期的增长,半刚性基层材料的模量逐渐增大,并且两者之间存在对数函数关系,相关性高达 98%;在计算(底)基层弯沉验收标准值时,需根据实际温度条件计算等效标准养生龄期,再根据室内试验关于材料在标准养护条件下的模量增长规律计算半刚性(底)基层验收弯沉值。

(2) 重载作用会对沥青路面产生较大影响,半刚性(底)基层顶面弯沉随荷载的增加而增加;针对行车超载严重的情况,有必要对不同荷载作用下半刚性基层弯沉验收标准值计算方法进行改进,从而保证路面结构设计的合理性,延长路面服役寿命。

#### 参考文献:

- [1] JTG D50—2006,公路沥青路面设计规范[S].
- [2] 王选仓,谭权,王新歧,等.重载沥青路面研究[J].西安公路交通大学学报,1998,18(4).
- [3] 郑健龙.基于状态设计法的沥青路面弯沉设计标准[J].中国公路学报,2012,25(4).
- [4] 姚祖康.沥青路面结构设计[M].北京:人民交通出版社,2011.

(下转第 90 页)

弹模量进行回归分析,结果图 2。

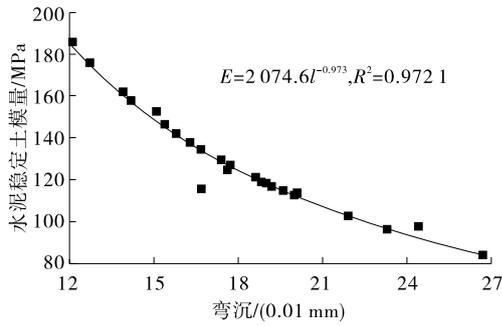


图 2 水泥稳定土结构层弯沉与回弹模量的关系

从图 2 可以看出:水泥稳定土弯沉与回弹模量之间存在良好的指数关系,相关系数  $R^2 = 0.9721$ , 相关性很好,表明能采用所得关系式进行水泥稳定土结构层弯沉与混合料回弹模量之间的换算。关系式为:

$$E = 2\ 074.6l^{-0.973}, R^2 = 0.9721$$

### 5 结论

(1) 水泥稳定土的无侧限抗压强度随着龄期的增长而增大,但增长幅度减缓,3~7 d 龄期的增长速率最快,7 d 龄期的无侧限抗压强度比 3 d 时增长 64.0%,28 d 龄期的无侧限抗压强度比 14 d 时仅增长 16.7%。

(2) 提高压实度能提高水泥稳定土结构层的承载能力。

(3) 水泥稳定土的养生龄期与无侧限抗压强度之间存在良好的对数关系,弯沉与回弹模量之间存在良好的指数关系。

### 参考文献:

[1] 岳福青,杨春风,魏连雨.半刚性基层沥青路面反射裂

缝形成扩展机理与防治[J].河北工业大学学报,2004,33(1).

[2] 袁玉卿,刘松利,刘绍宁,等.振冲碎石桩处治粉砂性湿软地基研究[J].河南大学学报:自然科学版,2011,41(5).

[3] 袁玉卿.路基路面工程[M].北京:中国电力出版社,2010.

[4] 沙爱民.半刚性基层的材料特性[J].中国公路学报,2008,21(1).

[5] JTG D50-2006,公路沥青路面设计规范[S].

[6] 钱国平,蒋博,巨锁基.水泥稳定磷渣碎石混合料早期强度试验[J].中外公路,2016,36(1).

[7] Tong Xiao-dong, Gong Xiao-nan, Jiang Yong-sheng. Elastic-plastic damage model of cement-stabilized soil tong[J]. Engineering Mechanics, 2002, 19(6).

[8] 谭敏.半刚性基层材料的收缩性能研究综述[J].江苏科技大学学报:自然科学版,2011,25(10).

[9] 蔡智.半刚性基层收缩开裂机理与模型研究[D].武汉:武汉理工大学,2009.

[10] JTG/T F20-2015,公路路面基层施工技术细则[S].

[11] JTG F40-2004,公路沥青路面施工技术规范[S].

[12] JTG E51-2014,公路工程无机结合料稳定材料试验规程[S].

[13] 安平,高俊启,盛余祥.离析对水泥稳定碎石强度的影响及其控制[J].公路,2006(1).

[14] 查旭东.PFWD快速检测路基模量研究[J].公路交通科技,2009,26(1).

[15] 张汝腾.交通路面水泥稳定土基层的施工监理[J].工程建设与设计,2016(10).

[16] 曹莉萍.减少水泥稳定土基层收缩裂缝的措施[J].华东公路,2014(3).

[17] 皇甫骥,李豪,王树杰.半刚性基层沥青路面弯沉验收标准研究[J].公路与汽运,2017(2).

收稿日期:2016-11-03

\*\*\*\*\*  
(上接第 86 页)

[5] 沙爱民.半刚性基层的材料特性[J].中国公路学报,2008,21(1).

[6] 吕松涛,郑健龙,仲文亮.养生期水泥稳定碎石强度、模量及疲劳损伤特性[J].中国公路学报,2015,28(9).

[7] 王崇涛,郑木莲,王选仓.半刚性基层不同龄期弯沉检验标准[J].长安大学学报:自然科学版,2008,28(6).

[8] 皇甫骥,李豪,王树杰.半刚性基层沥青路面弯沉验收标准研究[J].公路与汽运,2017(2).

[9] 王理吉.新疆公路路基路面弯沉验收标准修正方法研

究[D].西安:长安大学,2009.

[10] 谭敏.半刚性基层材料的收缩性能研究综述[J].江苏科技大学学报:自然科学版,2011,25(10).

[11] 蔡智.半刚性基层收缩开裂机理与模型研究[D].武汉:武汉理工大学,2009.

[12] JTG E51-2014,公路工程无机结合料稳定材料试验规程[S].

收稿日期:2016-11-11