

文章编号:1671-8879(2008)06-0025-05

半刚性基层不同龄期弯沉检验标准

王崇涛^{1,2}, 郑木莲¹, 王选仓¹

(1. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064;
2. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710075)

摘 要:半刚性基层材料的强度与模量随龄期增长, 基层弯沉值也随着龄期变化。为得到半刚性基层不同龄期的弯沉检测标准, 在室内成型二灰土和二灰碎石试件, 并在标准条件下养生; 采用顶面法测定试件不同龄期的抗压回弹模量, 得出其模量随龄期增长的规律, 将其代入弹性层状体系理论简化公式中, 得出不同龄期半刚性基层顶面弯沉值计算公式, 并给出其实例应用的说明。结果表明, 采用该弯沉公式并结合路面实测数据计算出的弯沉值, 作为相应龄期半刚性基层的施工弯沉检验标准值, 能充分反映半刚性基层弯沉值随龄期的变化规律, 更好地评价路面施工质量。

关键词:道路工程; 半刚性基层; 弯沉; 抗压回弹模量; 简化公式

中图分类号:U414.11 **文献标志码:**A

Deflection checking standard of semi-rigid base in different ages

WANG Chong-tao^{1,2}, ZHENG Mu-lian¹, WANG Xuan-cang¹

(1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Chinese First Institute Limited Corporation of Highway Survey and Design, Xi'an 710075, Shaanxi, China)

Abstract: The strength and modulus of semi-rigid base material increase with age, so the reflection of base varies with age too. In order to get the deflection test standard for semi-rigid base at different ages, indoor test pieces of lime-flyash stabilized soil and lime-flyash stabilized crushed stone were formed and cured at the standard condition. The compression rebound modulus at different ages were tested with top surface measuring method, and the modulus development law with age was drawn. The top deflection calculation formula of semi-rigid base at different ages was got by substitution of the development law into the simplified formula of elastic layered system theory, and the application was explained with experiment road. The results show that taking the deflection calculated by the formula and pavement test data as construction deflection test standard of semi-rigid base at corresponding age can fully consider the deflection variety law of semi-rigid base with age, so as to evaluate the pavement construction quality better. 2 tabs, 2 figs, 9 refs.

Key words: road engineering; semi-rigid base; deflection; compression rebound modulus; simplified formula

收稿日期: 2007-12-20

基金项目: 国家西部交通科技建设项目(200631800005; 200531879511)

作者简介: 王崇涛(1975-), 男, 山东青岛人, 中交第一公路勘察设计研究院有限公司工程师, 长安大学工学博士研究生,

E-mail: chongtao0611@163.com.

0 引言

半刚性基层材料的强度与模量在一定温度范围内随龄期增长而增长,一般情况下,水泥稳定材料在3个月后强度即趋于稳定,石灰土、石灰粉煤灰稳定材料在6个月后强度增长缓慢。因此,水泥稳定材料及石灰土和二灰稳定材料的设计参数是在室内标准养生条件下,分别以3个月(90 d)龄期、6个月(180 d)龄期为标准测得的。文献[1]规定:路基路面各结构层完工以后,应检测弯沉值来控制各结构层的施工质量。计算弯沉检验标准值时,应用半刚性基层材料设计龄期的模量,但是施工过程中,处于较短龄期的半刚性基层一般达不到设计强度,而且由于工期原因,也不可能对路面各基层留有足够的养生龄期,以检验各层弯沉值是否达到设计要求。施工过程中所测弯沉值与按设计龄期材料参数计算的弯沉标准值在时间上不一致,因此,半刚性基层完工后所测弯沉值与计算得出的弯沉检验标准值之间无可比性,无法评价质量是否满足要求。半刚性基层材料强度随龄期的增长,必然导致基层弯沉值也随龄期变化,基层施工弯沉检验标准值亦应随基层、底基层施工龄期动态变化^[2]。为此,本文以二灰土底基层、二灰碎石基层路面结构为例,通过试验得出基层材料强度随龄期的增长规律,采用不同龄期半刚性材料的模量代替材料设计龄期的模量,应用弹性层状体系理论双轮隙路表弯沉简化公式,计算各结构层弯沉值,作为相应龄期的施工弯沉检验标准值。

1 半刚性基层材料模量随龄期增长规律

据有关试验规程,对二灰稳定土(石灰、粉煤灰、土的比例(质量比)为8:32:60,以下类同)和二灰稳定碎石(石灰、粉煤灰、碎石的比例为8:17:75)两种半刚性基层材料,按98%的压实度室内成型 $\Phi 10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ 试件^[3],试件在标准条件下(室内养生温度为 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 、相对湿度大于90%)养生,采用顶面法分别测定两种材料7、28、90、180 d龄期的抗压回弹模量,通过分析测试结果,得出这两种材料模量随龄期增长的规律。

1.1 二灰稳定土模量随龄期增长规律

对标准养生二灰稳定土不同龄期的有效试验数据进行处理,计算出抗压回弹模量的平均值、标准差、偏差系数和代表值(表1)。

对表1数据回归分析,得出二灰稳定土抗压回弹模量 E 随龄期 D 的增长关系式(R 为相关系数)为

表1 二灰稳定土底基层抗压回弹模量试验数据

| 龄期/d | 7 | 28 | 90 | 180 |
|---------|-----|------|------|-------|
| 平均值/MPa | 98 | 185 | 659 | 1 126 |
| 标准差/MPa | 8.5 | 27.4 | 88.3 | 183.5 |
| 偏差系数/% | 8.7 | 14.8 | 13.4 | 16.3 |
| 代表值/MPa | 84 | 140 | 514 | 824 |

$$E = 16.873D^{0.737}, R^2 = 0.92 \quad (1)$$

1.2 二灰稳定碎石模量随龄期增长规律

对标准养生二灰稳定碎石不同龄期的有效试验数据进行处理,计算出抗压回弹模量的平均值、标准差、偏差系数和代表值(表2)。

表2 二灰稳定碎石基层抗压回弹模量试验数据

| 龄期/d | 7 | 28 | 90 | 180 |
|---------|------|-------|-------|-------|
| 平均值/MPa | 448 | 744 | 1 237 | 1 926 |
| 标准差/MPa | 55.1 | 103.3 | 152.3 | 241.5 |
| 偏差系数/% | 13.3 | 14.5 | 12.3 | 12.5 |
| 代表值/MPa | 324 | 541 | 986 | 1 528 |

通过对表2数据回归分析,得出二灰稳定碎石抗压回弹模量 E' 随龄期 D 的增长关系式为

$$E' = 121.42D^{0.474}, R^2 = 0.96 \quad (2)$$

2 弹性层状体系理论计算双轮隙路表弯沉简化公式

2.1 三层连续体系

典型三层体系路面结构(图1)的路表轮隙理论弯沉系数 α_c 的计算式为^[4]

$$\ln(\alpha_c) = 0.066 - 0.154 \ln(x) + 0.7 \cdot$$

$$\ln \left[\left(1 - \frac{1}{\sqrt{1+h_1^2}} \right) \frac{E_0}{E_1} + \left\{ \frac{1}{\sqrt{1+h_1^2(E_1/E_2)^{0.07}}} - \frac{1}{\sqrt{1+(h_1/\sqrt{E_1/E_2}+h_2)^{1.85}}} \right\} \frac{E_0}{E_2} + \frac{1}{\sqrt{x}} \right] \quad (3)$$

$$\text{式中: } h_1 = \frac{0.8H_1}{\delta}; h_2 = \frac{0.8H_2}{\delta};$$

$$x = 1 + \left[h_1 \left(\frac{E_1}{E_0} \right)^{0.285} + h_2 \left(\frac{E_2}{E_0} \right)^{0.285} \right]^{1.9}.$$

根据文献[5],轮隙中心处(图1、图2(见下页)的A点)路表弯沉值 l_s 的计算式为

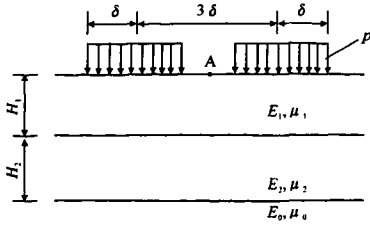
$$l_s = 1\,000 \frac{2p\delta}{E_0} \alpha_c F \quad (4)$$

$$F = 1.63 \left(\frac{l_s}{2\,000\delta} \right)^{0.38} \left(\frac{E_0}{p} \right)^{0.36} \quad (5)$$

式中: F 为弯沉综合修正系数;其余符号意义见图1、图2所示。

将式(5)代入式(4),得

$$l_s = 2\,000\delta(1.63\alpha_c)^{1.613} (p/E_0)^{1.032} \quad (6)$$



注: δ 为标准轴载单轮传压面当量圆的半径 (cm); p 为标准轴载的轮胎接地压强 (MPa); H 为结构层厚度 (cm); H_1, H_2 均为结构层厚度 (cm); E_1, E_2 均为结构层模量 (MPa); μ_1, μ_2 均为结构层材料泊松比; E_0 为土基回弹模量 (MPa); μ_0 为土基泊松比。

图1 典型三层体系路面的计算

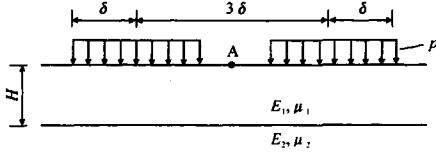


图2 典型双层体系路面的计算

式(6)即为弹性层状体系理论计算双轮隙路表弯沉简化公式,其在下列参数范围内有较好的精度: $E_2/E_1 = 0.3 \sim 2.0$; $E_0/E_2 = 0.02 \sim 0.2$; $H_1/\delta = 0.4 \sim 5.5$; $H_2/\delta = 1.5 \sim 5.4$,面层的泊松比取值为0.25,其余各层均为0.35。

考虑施工特性后发现,检验基层顶面的施工弯沉值时,当结构参数范围在简化公式要求的范围内时,可以直接利用三层连续体系的简化公式。

2.2 双层连续体系

由三层连续体系双圆垂直荷载下弯沉简化公式,可进一步推出双层连续体系(图2)双圆垂直荷载轮隙理论弯沉系数 α' 的简化公式

$$\ln(\alpha'_c) = 0.066 - 0.154 \ln(x') + 0.7 \cdot$$

$$\ln \left[\left(1 - \frac{1}{\sqrt{1+h^{1.85}}} \right) \frac{E_2}{E_1} + \frac{1}{\sqrt{x'}} \right] \quad (7)$$

$$\text{式中: } h = \frac{0.8H}{\delta}; x' = 1 + h^{1.9} \left(\frac{E_1}{E_2} \right)^{0.5415}.$$

路表弯沉值按式(6)计算,该公式在模量参数范围内($E_2/E_1 = 0.02 \sim 0.2$, $H/\delta = 1.5 \sim 5.4$)时精度很高。

检验底基层顶面的施工弯沉值时,当结构参数在简化公式要求的范围内时,可直接利用双层连续体系的简化公式。

3 半刚性基层顶面不同龄期施工弯沉检验标准计算公式

计算理论弯沉系数简化公式中,各结构层模量

值均取设计值,而基层施工弯沉检验标准值是随基层、底基层施工龄期动态变化的。为此,用前面得到的半刚性基层强度随龄期增长关系代替结构层模量设计值,可得到理论弯沉系数与龄期的关系,进而得到不同龄期的弯沉计算值,以此作为该龄期弯沉检测标准值。

3.1 二灰土底基层

令 H 为二灰土底基层厚度 (cm), 将式(1)代入式(7),整理得出二灰土底基层顶面龄期为 D_1 时理论弯沉系数的 α_{cD_1} 的简化公式

$$\ln(\alpha_{cD_1}) = 0.066 - 0.154 \ln(x_1) + 0.7 \cdot$$

$$\ln \left[\left(1 - \frac{1}{\sqrt{1+h^{1.85}}} \right) \frac{E_0}{16.873D_1^{0.737}} + \frac{1}{\sqrt{x_1}} \right] \quad (8)$$

$$\text{式中: } x_1 = 1 + h^{1.9} \left(\frac{16.873D_1^{0.737}}{E_0} \right)^{0.5415}.$$

根据公路沥青路面设计规范^[5],可得出二灰土底基层顶面施工弯沉检验标准值 l_{sD_1} 计算公式为

$$l_{sD_1} = 2000\delta(1.63\alpha_{cD_1})^{1.613}(p/E_0)^{1.032} \quad (9)$$

3.2 二灰碎石基层

令 H_1 为二灰碎石基层厚度 (cm), H_2 为二灰碎石底基层厚度 (cm), 将式(2)代入式(3),整理得出二灰碎石基层顶面弯沉检测时基层材料龄期为 D_2 时理论弯沉系数 α_{cD_2} 的简化公式

$$\ln(\alpha_{cD_2}) = 0.066 - 0.154 \ln(x_2) + 0.7 \cdot$$

$$\ln \left[\left(1 - \frac{1}{\sqrt{1+h_1^2}} \right) \frac{E_0}{121.42D_2^{0.474}} + \frac{1}{\sqrt{1+h_1^2(121.42D_2^{0.474}/16.873D_3^{0.737})^{0.07}}} + \frac{1}{\sqrt{1+(h_1 \sqrt{(121.42D_2^{0.474}/16.873D_3^{0.737})} + h_2)^{1.85}}} \right] \cdot \frac{E_0}{16.873D_3^{0.737}} + \frac{1}{\sqrt{x_2}} \right] \quad (10)$$

$$\text{式中: } x_2 = 1 + \left[h_1 \left(\frac{121.42D_1^{0.474}}{E_0} \right)^{0.285} + h_2 \left(\frac{16.873D_2^{0.737}}{E_0} \right)^{0.285} \right]^{1.9}; D_3 \text{ 为基层顶面弯沉检测时底基层材料的龄期;其余符号意义同前。}$$

根据规范^[1],可得出二灰碎石基层顶面施工弯沉检验标准值 l_{sD_2} 的计算公式为

$$l_{sD_2} = 2000\delta(1.63\alpha_{cD_2})^{1.613}(p/E_0)^{1.032} \quad (11)$$

4 理论弯沉系数简化公式温度修正

上述理论弯沉系数简化公式中,半刚性材料强度随龄期增长的关系在室内标准养生条件下得出,

而现场施工检测时,半刚性材料的强度在自然养生条件下形成。半刚性材料强度的形成、增长与养生状况有关,自然养生条件下某一龄期半刚性材料强度与同龄期室内标准养生条件下的强度可能存在差异。已有研究表明:经过较高温度和较好气候条件养生的半刚性基层比气候条件差时施工的基层,弯沉值要小得多^[6-7],因此,应用简化公式时先要将标准养生与自然养生间的差异消除。

湿度一定时,半刚性基层材料的强度是时间和温度的函数,也即对于同一状态的试件,以不同温度和不同时间所形成的强度,总有可能等于标准养生条件下某一龄期的结果。文献[8]建立了温度-时间换算公式,将自然养生条件下的龄期换算为标准养生条件下的龄期为

$$\frac{D_{20}}{D_T} = \left[\frac{T-4}{20-4} \right]^a \quad (12)$$

式中: T 为某养生温度($^{\circ}\text{C}$); D_{20} 、 D_T 分别为标准养生温度 20°C 和 $T(^{\circ}\text{C})$ 的养生时间(d); a 为与 T 有关的系数,其值为

$$\lg(a) = 0.059\,3 + 0.006\,34T \quad (13)$$

已有研究表明^[9],日平均气温 T_0 与灰土类等基层温度 T 的关系为

$$T = 1.21T_0 + 3.83 \quad (14)$$

式中: $T_0 \geq 10^{\circ}\text{C}$, 当 $T_0 < 10^{\circ}\text{C}$ 时, T 的结果应减去 $0.5(10 - T_0)$ 的修正系数。

由于半刚性基层施工后,总是要洒水养护,这种状况与雨天的状况接近,层间温差甚小,可不考虑温度坡降,计算的 T 值可代表层内的温度。

根据式(12),可将半刚性基层材料在温度 T 下的养生时间换算成标准养生温度 20°C 下的养生时间,之后即可代入简化公式进行计算。

5 算 例

5.1 试验路段

以西户(西安—户县)高速公路试验路段(K2+360~K2+460)所采集的数据,说明如何确定不同龄期半刚性基层施工的弯沉检验标准值。

试验路段:土质为粘性土,平均稠度为 1.38,土基回弹模量设计值为 38 MPa。路面结构:4 cm 的 AC-16、5 cm 的 AC-20、6 cm 的 AC-25、32 cm 的二灰碎石基层、20 cm 的二灰土底基层。设计参数:二灰碎石抗压回弹模量为 900 MPa;二灰土抗压回弹模量为 550 MPa。底基层顶面弯沉值现场检验龄期为 10 d,检测日期为 2004 年 6 月 26 日,底基层养护

期间平均温度为 23.6°C ;基层顶面弯沉值现场检验龄期为 14 d,检测日期为 2004 年 7 月 20 日,基层养护期间平均温度为 26.7°C 。

基层顶面实测弯沉值为

$$l_1 = 30.78(0.01\text{ mm})$$

底基层顶面实测弯沉值为

$$l_2 = 151.40(0.01\text{ mm})$$

5.2 弯沉检验

5.2.1 二灰土底基层

二灰土底基层温度

$$T_1 = 1.21 \times 23.6 + 3.83 = 32.386(^{\circ}\text{C}),$$

则有 $\lg(a) = 0.059\,3 + 0.006\,34 \times 32.386 = 0.265$,解得 $a = 1.841$;

$D_{20}/10 = [(32.386 - 4)/(20 - 4)]^{1.841}$,求解得二灰土底基层在标准养护龄期 $D_{20} = 29(\text{d})$,即 $D_1 = 29(\text{d})$ 。

标准养护 29 d,二灰土底基层抗压回弹模量为

$$E_{29} = 16.873 \times 29^{0.737} = 202(\text{MPa})$$

简化公式中: $E_0/E_{29} = 38/202 = 0.188$;底基层厚度 $H = 20\text{ cm}$,所以有

$$h = 0.8H/\delta = 0.8 \times 20/10.65 = 1.50,$$

$$x_1 = 1 + 1.50^{1.9} \times (202/38)^{0.5415} = 6.339,$$

$$\ln(\alpha_{c29}) = 0.066 - 0.154 \ln(6.339) + 0.7 \cdot$$

$$\ln \left[\left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + 1.5^{1.85}}} \right) \times 0.188 + \frac{1}{\sqrt{6.339}} \right]$$

解得 $\alpha_{c29} = 0.48$ 。

因此,底基层施工弯沉检验标准值为

$$l_{sD_1} = 2\,000 \times 10.65 \times (1.63 \times 0.48)^{1.613} \times (0.7/38)^{1.032} = 232.45(0.01\text{ mm})$$

由于底基层顶面实测弯沉值为 $151.40(0.01\text{ mm})$,小于底基层施工弯沉检验标准值 l_{sD_1} ,说明底基层施工强度达到设计要求。

5.2.2 二灰碎石基层

二灰碎石基层温度

$$T_2 = 1.21 \times 26.7 + 3.83 = 36.137(^{\circ}\text{C}),$$

则有 $\lg(a) = 0.059\,3 + 0.006\,34 \times 36.137 = 0.288$,解得 $a = 1.941$;

$D_{20}/14 = [(36.137 - 4)/(20 - 4)]^{1.941}$,解得二灰碎石基层在标准养护下龄期 $D_{20} = 54(\text{d})$,即 $D_2 = 54(\text{d})$ 。

标准养护 54 d,二灰碎石基层抗压回弹模量为

$$E_{54} = 121.42 \times 54^{0.474} = 804(\text{MPa})$$

此时,二灰土底基层温度 $T_1 = 1.21 \times (26.7 + 23.6)/2 + 3.83 = 34.262(^{\circ}\text{C})$;

则有 $\lg(a) = 0.059\ 3 + 0.006\ 34 \times 34.262 = 0.277$,
解得 $a = 1.892$;

由 $D_{20}/25 = [(34.262 - 4)/(20 - 4)]^{1.892}$, 解得
二灰土底基层在标准养护下龄期 $D_{20} = 84(\text{d})$ 。

标准养护 84 d, 二灰土底基层抗压回弹模量为

$$E_{84} = 16.873 \times 84^{0.737} = 442(\text{MPa})$$

简化公式中: $E_0/E_{54} = 0.05$, $E_0/E_{84} = 0.086$,
 $E_{84}/E_0 = 11.63$, $E_{54}/E_0 = 21.16$, $E_{54}/E_{84} = 1.82$,
 $H_1 = 32\text{ cm}$, $H_2 = 20\text{ cm}$ 。则有

$$h_1 = 0.8 \times 32/10.65 = 2.40, h_2 = 0.8 \times 20/10.65 = 1.50,$$

$$x_2 = 1 + [2.4 \times 21.16^{0.285} + 1.5 \times$$

$$11.63^{0.285}]^{1.9} = 62.58,$$

$$\ln(\alpha_{c54}) = 0.066 - 0.154 \ln(62.58) + 0.7 \cdot$$

$$\ln \left[\left(1 - \frac{1}{\sqrt{1+2.4^2}} \right) \times 0.05 + \left(\frac{1}{\sqrt{1+2.4^2 \times 1.82^{0.07}}} - \frac{1}{\sqrt{1+(2.4 \times \sqrt{1.82+1.5})^{1.85}}} \right) \times 0.086 + \frac{1}{\sqrt{62.01}} \right],$$

解得: $\alpha_{c54} = 0.163$ 。

因此, 基层顶面施工弯沉检验标准值为

$$l_{s_{D_2}} = 2\ 000 \times 10.65 \times (1.63 \times 0.163)^{1.613} \times (0.7/38)^{1.032} = 40.79(0.01\text{ mm})$$

由于基层顶面实测弯沉值为 30.78(0.01 mm),
小于基层顶面施工弯沉检验标准值 $l_{s_{D_2}}$, 说明基层
施工强度达到设计要求。

6 结 语

(1) 通过试验, 得出二灰土和二灰碎石两种半刚性基层材料强度随龄期的增长关系。

(2) 将得出的二灰土和二灰碎石强度随龄期的增长关系, 代入弹性层状体系理论计算双轮隙路表弯沉简化公式中, 计算不同龄期的各结构层弯沉值, 并作为相应龄期的施工弯沉检验标准值。

(3) 通过试验路实测数据, 说明用简化公式进行不同龄期的结构层弯沉检测切实可行。

参考文献:

References:

- [1] JTJ 034—2000, 公路路面基层施工技术规范[S].
- [2] 王宏畅, 黄晓明, 傅 智. 半刚性基层表面裂缝影响因素[J]. 交通运输工程学报, 2005, 5(2): 38-41.
WANG Hong-chang, HUANG Xiao-ming, FU Zhi. Influence factors on surface crack of semi-rigid base course[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2005, 5(2): 38-41.
- [3] 张嘎吱, 沙爱民. 水泥粉煤灰稳定碎石配合比设计[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2007, 27(5): 16-19.
ZHANG Ga-zhi, SHA Ai-min. Mixing design of cement-fly-ash stabilized crushed-stones[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2007, 27(5): 16-19.
- [4] 邓学钧. 路基路面工程[M]. 北京: 人民交通出版社, 2000.
- [5] JTJ D50—2006, 公路沥青路面设计规范[S].
- [6] 冯光乐, 许志鸿, 凌天清. 半刚性基层施工弯沉检测标准研究[J]. 同济大学学报, 2003, 31(2): 156-160.
FENG Guang-le, XU Zhi-hong, LING Tian-qing. Study on semi-rigid base deflection criterion during construction[J]. Journal of Tongji University, 2003, 31(2): 156-160.
- [7] 康海贵, 郑元勋, 蔡迎春, 等. 实测沥青路面温度场分布规律的回归分析[J]. 中国公路学报, 2007, 20(6): 13-18.
KANG Hai-gui, ZHENG Yuan-xun, CAI Ying-chun, et al. Regression analysis of actual measurement of temperature field distribution rules of asphalt pavement[J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20(6): 13-18.
- [8] 刘树堂, 商庆森, 杨永顺, 等. 用芯样评定半刚性材料结构层强度的分析[J]. 国外公路, 1999, 19(4): 24-26.
LIU Shu-tang, SHANG Qing-sen, YANG Yong-shun, et al. Strength analysis for semi-rigid material structures evaluated by core samples[J]. Journal of Foreign Highway, 1999, 19(4): 24-26.
- [9] 王崇涛. 西安公路设计参数及弯沉控制标准研究[D]. 西安: 长安大学, 2005.