

文章编号:1671-8879(2009)06-0001-05

# 路基顶面回弹弯沉验收标准的修正

王选仓<sup>1</sup>, 马玉兰<sup>1,2</sup>, 张磊<sup>3</sup>

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 福州市公路局, 福建 福州 350002;  
3. 河南中原高速公路股份有限公司 郑石分公司, 河南 平顶山 467000)

**摘 要:**在分析路基回弹模量与土质、压实度、含水量之间关系的基础上,研究了路基回弹模量与含水量(或稠度)之间的相互关系;提出了基于验收实际稠度比的土基模量季节影响系数及适用于任一时间的路基顶面弯沉验收标准修正方法。结果表明:西北黄土区不同季节土基回弹模量与含水量呈幂指数关系;室内土基回弹模量与相应稠度之间呈线性关系;利用稠度比系数法修正路基弯沉验收标准更接近工程实际。

**关键词:**道路工程;路基;回弹弯沉;含水量;验收标准

**中图分类号:**U416.1 **文献标志码:**A

## Rebound deflection criterion of subgrade

WANG Xuan-cang<sup>1</sup>, MA Yu-lan<sup>1,2</sup>, ZHANG Lei<sup>3</sup>

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Fuzhou City Highway Administration, Fuzhou 350002, Fujian, China; 3. Zhengzhou-Shijiazhuang Branch, Henan Zhongyuan Expressway Co Ltd, Pingdingshan 467000, Henan, China)

**Abstract:** Based on analyzing the relationship between the subgrade rebound deflection and soil features, compaction degree, moisture content and so on, this paper studied the interrelationship between moisture content and the subgrade deflection, and found a method to define the seasonal influence of subgrade deflection as consistency correlation. It put forward a new method to determine the subgrade deflection criterion value, which studies for any time. The results indicated that: the different season subgrade deflection and moisture content is power exponent relation; but the relationship between indoor subgrade deflection and consistency is linear; the method of consistency correlation that determines the subgrade deflection value is closer to engineering practice. 5 tabs, 1 fig, 14 refs.

**Key words:** road engineering; subgrade; rebound deflection; moisture content; checking criterion

## 0 引 言

《公路工程质量检验评定标准》规定,路基顶面竣工弯沉值应“不大于设计计算值”<sup>[1]</sup>。实际工程因受施工进度限制,路基弯沉验收往往在非不利季节,

所以其弯沉值与实际路面设计中采用的不利季节路表弯沉值并不相符<sup>[2]</sup>。土基模量季节影响系数  $K_1$  的取值也应根据实地试验取得,而实际中往往缺乏这类资料,一般都只能套用相关规范上的参考值,难以反映路基的实际情况。目前,部分学者对路基弯

收稿日期:2008-12-12

基金项目:国家西部交通建设科技项目(2001 318 825 94)

作者简介:王选仓(1956-),男,陕西西安人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:wxc2005@163.com。

沉进行了研究<sup>[3-11]</sup>,但研究结果只是针对特定地区,不能很好地推广,更好地指导施工。为进一步合理控制路基施工质量,减少路面破坏带来的经济损失,本文从路基弯沉的影响因素出发,利用含水量(或稠度)与路基回弹模量之间的相互关系,提出任意时间段路基弯沉验收标准的修正方法。

1 影响因素分析

路面设计中只有土基回弹模量  $E_0$  的要求,而无路基顶面回弹弯沉值的设计计算值,所以要通过路基弯沉与其模量之间的相互关系式来确定路基回弹弯沉值的验收标准<sup>[12]</sup>。土基回弹模量主要受土质类型、土基的压实度及土基含水量等因素的影响。

1.1 土质与土基回弹模量的相关性

不同土质对水的敏感性不同。细粒成分多的土(如粘性土、塑性指数高的粘土),水的侵入使土体含水量增加,体积发生明显膨胀,且膨胀率和初始含水量有关,初始含水量越小,膨胀率越大;相反,土体含水量变小,体积发生明显收缩,引起土体开裂。细粒成分含量少的土(砂性土和塑性指数不大的砂砾土、碎石土),在施工碾压时,其压实度对含水量不敏感,可以放宽对含水量的控制。在路面投入使用后,水的侵入不会使土体发生明显膨胀,含水量减小,土体也不会明显收缩<sup>[13]</sup>。

土基回弹模量  $E_0$  可采用下式求得

$$E_0 = A(\omega/\omega_y)^{-b} = (73M^3 + 10)K_L^{2.5}(\omega/\omega_y)^{I_{py}K_L/6}$$

式中: $A$ 、 $b$  均为回归系数; $M$  为砂粒含量(质量分数),以小数计; $I_{py}$  为以 76 g 平衡锤测得土的液限与塑限之差; $\omega_y$  为以 76 g 平衡锤测得土的液限; $\omega$  为土基含水量(质量分数); $K_L$  为要求的压实度。

在《公路沥青路面设计规范》中,根据公路土工试验规程给出的  $\omega_y$  与  $\omega_1$ (100 g 平衡锤的液限值),  $I_{py}$  与  $I_p$ (100 g 平衡锤测得土的液限与塑限之差,塑性指数)之间的换算关系式为

$$\omega_y = 6.5 + 0.66\omega_1$$

$$I_{py} = 0.68I_p - 0.44$$

土基稠度与土基相对含水量的换算式为

砂土:  $\omega_c = 3.096 - 2.730\omega_x$

粉土:  $\omega_c = 1.901 - 1.561\omega_x$

粘性土:  $\omega_c = 2.058 - 1.715\omega_x$

式中: $\omega_c$  为土基稠度; $\omega_x$  为土基相对含水量。

采用土基稠度  $\omega_c$ 、要求的压实度  $K_L$ (轻型标准)、塑性指数  $I_p$  和砂粒含量  $M$ ,求  $E_0$  的计算式为

砂土:  $E_0 = (73M^3 + 10)K_L^{2.5}(1.134 - 0.3663\omega_c)^{-(0.68I_p - 0.44) \frac{K_L}{6}}$

粉土:  $E_0 = (73M^3 + 10)K_L^{2.5}(1.217 - 0.6406\omega_c)^{-(0.68I_p - 0.44) \frac{K_L}{6}}$

粘性土:  $E_0 = (73M^3 + 10)K_L^{2.5}(1.2 - 0.5831\omega_c)^{-(0.68I_p - 0.44) \frac{K_L}{6}}$

1.2 压实度与土基回弹模量的相关性

压实度是影响土基回弹模量的重要因素,提高击实功不仅可以增加土的密实度,也可以相应提高土的强度,即压实土的强度在一定条件下可以通过增大压实功予以提高。

不同的击实标准,击实效果也不同。对于具体土基压实而言,轻型击实试验方法的压实功能相当于 6 ~ 8 t 压路机的碾压效果,重型击实试验方法的压实功能相当于 12 ~ 15 t 压路机的碾压效果。

例如,河南省南阳 IV<sub>2</sub> 地区的低液限粘土基现场,利用重型击实标准击实试验数据及文献[1] 中土基回弹模量与弯沉的经验公式,计算出轻型击实土基回弹模量值见表 1,天然含水量为 25%。

表 1 轻型、重型击实的土基回弹模量值

序号	弯沉值 / 0.01 mm	重型击实 $E_0$ / MPa	轻型击实 $E_0$ / MPa
1	243.0	63.88	45.96
2	180.0	74.45	58.11
3	228.0	64.33	48.33
4	214.0	70.90	50.80
5	215.0	56.79	50.61
6	429.0	51.31	28.90
7	405.0	59.09	30.34
8	355.0	54.70	33.85
均值	283.6	61.93	33.85

由表 1 的对比试验可以发现,重型击实标准得到的土基回弹模量值是轻型击实标准得到的土基回弹模量值的 1.3 倍,是文献[1] 中的上限。

1.3 含水量与土基回弹模量的相关性

除了受土质、压实度影响外,对于同一土质,土基回弹模量还随着土质含水量的变化而变化。对于同一压实度而言,当含水量较小时,随着含水量的增加,土基回弹模量会随之增大;当含水量增加到最佳含水量时,干密度达到最大值,土基回弹模量最大;随着含水量的再度增加,干密度开始下降,土基回弹模量便会降低。

有关资料显示<sup>[4-6]</sup>,保持干密度不变,仅含水量增加 1%(绝对值),可使土基回弹模量降低 8% ~ 18%,平均降低 11%;如考虑含水量增加使干密度

减小,则含水量增加 1%,可使土基回弹模量降低的百分数必然大于 11%。

1.4 土基回弹模量与压实度、稠度的相关性

在河南省某段黄状低液限土试验路上,实测不同路段含水量(或稠度)和其对应的压实度、土基回弹模量值,结果见表 2。

表 2 土基回弹模量、压实度及稠度的实测值

桩号	$w_c$	$K/\%$	$E_0/\text{MPa}$
K0+135	1.42	96.4	58.10
K0+185	1.58	99.1	67.21
K0+235	1.49	98.7	67.21
K0+185	1.53	99.3	71.87
K0+335	1.49	98.4	66.49
K0+385	1.49	97.7	66.26
K0+435	1.53	99.2	69.79
K0+485	1.54	100.0	72.89
K0+535	1.62	97.5	64.85
K0+585	1.52	98.4	69.19

利用表 2 数据,回归得出该地区黄状低液限土的土基回弹模量与压实度、稠度的关系式为

$$E_0 = 66.887K^{4.968}w_c^{0.193} \quad (R^2 = 0.929, n = 10)$$

式中: $n$  为函数回归的点个数; $K$  为压实度; $R^2$  为相关系数。

《公路沥青路面设计规范》给出了具有代表性的中国各地区土类的土基回弹模量与参数压实度和稠度的关系式,见表 3。

从表 3 各关系式可以看出,土基回弹模量与稠度、压实度存在良好的相关性。对于不同土质, $E_0$  与  $K$  和  $w_c$  的关系式有较大的差异,某地一种土的关系式不能用于另一种土。如要使用这种关系式,必须针对每一种土,通过试验得出相应关系式。

表 3 部分地区土类的土基回弹模量与压实度、稠度的关系

土料来源	关系式	$R^2$
广西红粘土	$E_0 = 79.08K^{1.989}w_c^{1.748}$	0.77
黑龙江粘质土	$E_0 = 48.81K^{3.218}w_c^{1.47}$	0.68
山西黄土	$E_0 = 52K^{0.61}w_c^{1.629}$	0.53
陕西黄土	$E_0 = 64K^{3.88}w_c^{2.23}$	0.96
江苏粘质土	$E_0 = 28.07K^{1.917}w_c^{1.932}$	0.88
内蒙古粘质土	$E_0 = 39K^{2.244}w_c^{1.905}$	0.61
河南粘质土	$E_0 = 66.887K^{4.977}w_c^{0.195}$	0.97
河北砂性土	$E_0 = 49.67K^{0.254}w_c^{0.986}$	0.65
陕西粘质土	$E_0 = 74K^{1.17}w_c^{2.50}$	0.92

2 土基回弹模量随含水量的变化规律

在不同地区、不同季节,土基强度的影响因素很多,土基回弹模量变化差别太大,按经验取值难免存在较大误差。施工过程中,在一定压实度下,含水量

是影响土基回弹模量季节变化的最主要因素。所以,实际上所谓的不利季节,主要是指一年中的土基含水量最大的季节。因此,可以通过不同季节的土基含水量与土基回弹模量的关系,合理确定路基弯沉验收时的土基回弹模量。

2.1 野外土基回弹模量与含水量的关系

在西北某高速公路,实测得到一年内随季节变化的土基含水量和土基回弹模量,见表 4。

表 4 不同季节的土基含水量和土基回弹模量

月份	$w/\%$	$E_0/\text{MPa}$	月份	$w/\%$	$E_0/\text{MPa}$
1	11.5	83.5	7	17.6	33.5
2	12.3	73.6	8	20.5	21.2
3	14.8	44.7	9	18.7	28.3
4	10.3	103.1	10	13.5	58.4
5	8.2	116.7	11	12.1	70.3
6	7.4	132.5	12	10.2	104.5

因受季节的影响,路基土处于冰冻状态季节时,其含水量和土基回弹模量都比较高,不符合随含水量的增加土基回弹模量值减小的规律。因此,在进行含水量和土基回弹模量回归分析中,仅考虑非冰冻状态季节的土基含水量和土基回弹模量值,回归分析结果如图 1 所示。

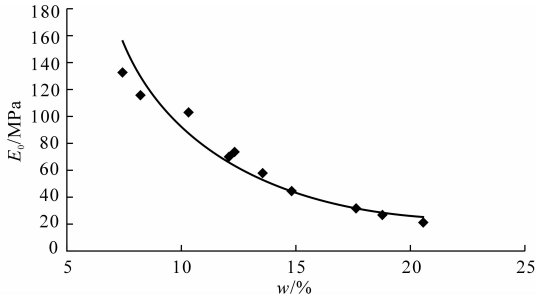


图 1 西北地区某高速公路土基含水量与回弹模量的关系

根据表 4 及图 1,得出西北黄土区不同季节土基回弹模量与含水量的幂指数关系式为

$$E_0 = 1.3768w^{-1.8381} \quad (R^2 = 0.9523)$$

2.2 室内土基回弹模量与含水量的关系

根据各地区室内土基回弹模量与相应稠度的分析结果,汇总见表 5。

表 5 部分地区室内土基回弹模量与稠度的检测结果

地区	土基类型	关系式	$R^2$
广州 — 花都公路	粘土质砂	$E_0 = -471.8067 + 256.079w_c$	0.95
国道 321 线	低液限粘土	$E_0 = -592.7846 + 571.1144w_c$	0.82
陕南地区	粘土	$E_0 = -245.64 + 263.45w_c$	0.92
陕北地区	黄土	$E_0 = -106.03 + 138.29w_c$	0.95
陕西关中地区	黄土	$E_0 = -638.84 + 609.5w_c$	0.84

室内外检测条件差异较大,所以室外测得的关系式与室内测得的关系式需要修正。

根据上述分析可以得出,当压实度一定时,土基回弹模量与含水量或稠度具有良好的相关性,相关系数很高;土基回弹模量季节影响系数可表示为最不利季节土基含水量或稠度与路基回弹弯沉检测时含水量或稠度的函数式。因为,在最不利季节时,土基含水量可看作定值,所以土基回弹模量季节影响系数可看作是路基回弹弯沉检测时对应含水量或稠度的函数式。根据该关系式及相应含水量或稠度,可得到任一时间路基回弹弯沉检测时的季节修正系数,从而修正路基回弹弯沉检测标准。该方法也称为路基顶面弯沉稠度比修正法。

### 3 稠度比修正法

在现行《公路路面基层施工技术规范》<sup>[14]</sup>中,关于路基顶面回弹弯沉检验值的确定按下式计算

$$l_0 = 9\,308E_0^{-0.938} \quad (1)$$

式中: $l_0$  为路基顶面回弹弯沉验收标准(0.01 mm)。

文献[8]提出,将土基回弹模量  $E_0$  按下式调整到非不利季节的土基回弹模量  $E'$ 。

$$E' = K_1 E_0$$

式中: $K_1$  为季节影响系数,不同的地区取值范围为 1.2 ~ 1.4,各地可根据经验确定。

实际上, $l_{0b} = K'_0 l_f$  也就意味着  $E'_0 = K_1 E_0$ ,用  $F(w_c)$  来代替  $K_1$ , $f(w_c)$  代替  $K'_0$ ,则有  $E_f = F(w_c)E_0$ 。 $K'_0$  为路基顶面回弹弯沉季节修正系数。利用土基回弹模量与路基稠度  $w_c$  的幂函数公式(记为  $E_0 = Aw_c^a$ )及回弹模量计算值,计算路基顶面弯沉的回归方程为  $l_0 = RE'_0$ ,则  $F(w_c)$ 、 $f(w_c)$  函数关系式分别为

$$F(w_c) = \left(\frac{w'_c}{w_{cb}}\right)^a$$

$$f(w_c) = \left(\frac{w'_c}{w_{cb}}\right)^b = \left(\frac{w'_c}{w_{cb}}\right)^{ar}$$

式中: $A$ 、 $R$  均为系数; $w'_c$  为路基回弹弯沉验收时该路段土基平均稠度; $w_{cb}$  为该路段不利季节的路基稳定稠度; $l_{0b}$  为不利季节的路基顶面回弹弯沉计算值; $l_f$  为非不利季节的路基顶面回弹弯沉计算值; $E_f$  为非不利季节的土基回弹模量; $E_b$  为不利季节的土基回弹模量; $a$  为土基回弹模量与稠度函数关系式中的幂指数; $r$  为土基回弹模量与路基回弹弯沉关系式中的幂指数,本文取  $r = -0.938$ 。

修正后的非不利季节土基回弹模量值和路基顶

面回弹弯沉验收标准  $l'_c$  分别为

$$E'_0 = K_1 E_0 = F(w_c)E_0 = (w'_c/w_{cb})^a E_0$$

$$l'_0 = f(w_c)l_0 \quad (2)$$

以河南省自然区划 II<sub>5</sub> 地区粘质土为例,已知  $E_0 = 48.944w_c^{1.6716}$  ( $R^2 = 0.9758$ ) (现场土基回弹模量与稠度的关系),则任一时间进行路基回弹弯沉检测相应的土基回弹模量值计算公式为

$$E'_0 = K_1 E_0 = \left(\frac{w'_c}{w_{cb}}\right)^a E_0 = \left(\frac{w'_c}{w_{cb}}\right)^{1.6716} E_0 \quad (3)$$

## 4 应用实例

以河南省某高速公路工程实际资料为例,该公路自然区划为 II<sub>5</sub>,路基顶面回弹弯沉验收标准  $l_0$  为 232.9(0.01 mm),土基为中湿、粘质土,土基回弹模量推荐值为 40 MPa;于 2005 年 11 月 10 日检测土基回弹弯沉,此时该路段土基平均稠度为 1.42,不利季节稠度为 1.03,该路段实际检测得到的代表弯沉值为 77.2(0.01 mm),计算该路段路基竣工验收弯沉标准。

### 4.1 《公路路面基层施工技术规范》的方法

根据《公路路面基层施工技术规范》附录 A 中有关规定,不同地区土基回弹模量的季节影响系数  $K_1 = 1.2 \sim 1.4$ ,这里取  $K_1 = 1.3$ 。

(1) 土基回弹模量的调整值

$$E'_0 = K_1 E_0 = 1.3 \times 40 = 52(\text{MPa})$$

(2) 修正后的路基顶面回弹弯沉验收标准  $l'_0$ 。

$$l'_0 = 9\,308E'^{-0.938}_0 = 9\,308 \times 52^{-0.938} = 228.9(0.01 \text{ mm})$$

### 4.2 土基回弹模量稠度比系数法修正

利用式(1) ~ 式(3),取  $a = 1.6716$ ,可得

(1) 土基回弹模量季节修正系数  $K_3$

$$K_3 = \left(\frac{w'_c}{w_{cb}}\right)^{1.6716} = \left(\frac{1.42}{1.03}\right)^{1.6716} = 1.7104$$

(2) 路基顶面回弹弯沉季节修正系数  $K'_0$ 。

$$K'_0 = K_3^{-0.938} = 1.7104^{-0.938} = 0.6044$$

(3) 修正后的路基顶面回弹弯沉验收标准

$$l'_0 = K'_0 l_0 = 0.6044 \times 232.9 = 140.8(0.01 \text{ mm})$$

从以上计算可以看出,利用 4.1 节方法得到的计算结果  $l'_0$  与路基顶面回弹弯沉验收标准  $l_0$  (232.9(0.01 mm)) 很接近,几乎达到了不利季节的验收标准。因为 11 月份属于干季,弯沉值要比不利季节小得多,所以利用 4.1 节方法计算得到的弯沉值明显达不到控制施工质量的要求。利用 4.2 节方法得

到该路段设定时间的路基顶面回弹弯沉验收标准为140.8 (0.01 mm),远小于4.1节方法的计算结果228.9 (0.01 mm)。实测得到的路基顶面回弹弯沉值为77.2(0.01 mm),小于140.8 (0.01 mm),符合路基回弹弯沉验收标准的要求。

从以上实例可以看出,利用4.1节方法的计算结果往往起不到控制路基施工质量的作用。随着施工技术的不断进步,20世纪80~90年代得到的相关经验数据已经不能满足工程质量的要求。4.2节的方法从影响路基弯沉季节性变化的主要因素出发,建立路基弯沉季节修正系数与稠度的关系式,不仅充分反映了各地区不同气候条件对道路的强度影响,且能与具体工程实际相结合,受人为影响较小,明显比4.1节方法更具有针对性、客观性和实用性。

## 5 结 语

(1)利用现行的《公路路面基层施工技术规范》修正路基弯沉验收标准,往往不能有效地控制路基施工质量。

(2)路基的土质、压实度和稠度是影响路基弯沉的主要因素,而稠度是与季节相关的最主要因素;利用土基回弹模量与土基含水量或稠度存在良好的相关性,将土基模量季节影响系数表示成最不利季节土基含水量或稠度与路基回弹弯沉检测时含水量或稠度的函数式。

(3)利用稠度比系数法修正路基回弹弯沉验收标准,不仅考虑到了季节因素,还进一步反映了工程实际,比《公路路面基层施工技术规范》中的方法更具有针对性、合理性,更接近工程实际,可有效地控制施工质量。

## 参考文献:

## References:

- [1] JTJ F 80/1—2004,公路工程质量检验评定标准[S].
- [2] Jin M S, Lee K W, Kovacs W D. Seasonal variation of resilient modulus of subgrade soils [J]. Journal of Transportation Engineering, 1994, 120(4): 603-616.
- [3] 覃绮平. 土基回弹模量影响因素及相关关系研究[D]. 西安:长安大学, 2005.
- [4] 杨永红, 王选仓, 韩国杰, 等. 甘肃黄土地区土基回弹模量[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2005, 25(3): 7-10. YANG Yong-hong, WANG Xuan-cang, HAN Guo-jie, et al. Rebound module of subgrade in Gansu loess area[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2005, 25(3): 7-10.
- [5] 易伟建, 周云, 张望喜. 弹性地基板模态试验及地基

动参数识别[J]. 中国公路学报, 2007, 20(2): 1-6.

YI Wei-jian, ZHOU Yun, ZHANG Wang-xi. Modal experiment on elastic foundation slab and identification of dynamic foundation parameters [J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20(2): 1-6.

- [6] 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): 25-30.

WANG Chong-tao, ZHENG Mu-lian, WANG Xuan-cang. Deflection checking standard of semi-rigid base in different ages[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2008, 28(6): 25-30.

- [7] 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.

- [8] 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.

- [9] 王东耀, 折学森, 叶万军, 等. 高速公路软基最终沉降预测的范例推理方法[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2006, 26(1): 20-23, 42.

WANG Dong-yao, SHE Xue-sen, YE Wang-jun, et al. Case-based reasoning approach to settlement of expressway on soft foundation[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2006, 26(1): 20-23, 42.

- [10] 章定文, 刘松玉. 软土地基高速公路扩建中新老路堤相互作用数值分析[J]. 中国公路学报, 2006, 19(6): 7-12.

ZHANG Ding-wen, LIU Song-yu. Numerical analysis of interaction between old and new embankment in widening of freeway on soft ground [J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(6): 7-12.

- [11] 傅珍, 王选仓, 陈星光, 等. 拓宽路基差异沉降特性和影响因素[J]. 交通运输工程学报, 2007, 7(1): 54-57.

FU Zhen, WANG Xuan-cang, CHEN Xing-guang, et al. Differential settlement characteristics and influencing factors of widening subgrade [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2007, 7(1): 54-57.

- [12] 查旭东. 路面结构层模量反算方法综述[J]. 交通运输工程学报, 2002, 2(4): 1-6.

ZHA Xu-dong. Summary of backcalculation methods of pavement layer moduli [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2002, 2(4): 1-6.

- [13] 马玉兰. 路基路面弯沉验收标准修正方法研究[D]. 西安:长安大学, 2008.

- [14] JTJ 034—2000,公路路面基层施工技术规范[S].