

文章编号:1671-8879(2005)03-0001-06

不同等效原则的基层顶面当量回弹模量算法

蒋应军, 戴经梁, 陈忠达

(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)

摘 要:应用弹性层状理论,研究了不同等效方法对基层顶面当量回弹模量换算结果的影响。结果表明,以弯沉等效为指标的基层顶面当量回弹模量值不能很好地反映板下地基的受力特性,会导致板底应力计算结果偏小;而以板底拉应力等效为指标的基层顶面当量回弹模量值能较为真实地反映基层刚度和厚度变化对板底拉应力的影响。因此,对于水泥混凝土路面结构设计时建议采用基于拉应力等效的换算方法,而基于弯沉等效的换算方法则可用于基层(或垫层)弯沉的检测。

关键词:道路工程;水泥混凝土路面;弹性层状理论;弯沉等效;拉应力等效;当量回弹模量

中图分类号:U416.216

文献标识码:A

Calculation method of equivalent modulus of elasticity of foundation under principles of different equivalence

JIANG Ying-jun, DAI Jing-liang, CHEN Zhong-da

(Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: The paper studied the calculation method of equivalent modulus of elasticity of foundation under principles of different equivalence by elastic multi-layer theory. The principles of displacement equivalence could not accurately image the stress response of foundation under cement concrete pavement, which induce the biggish error of flexural tensile stress of cement concrete pavement. But the principles of stress equivalence could accurately reflect the influence on the cement concrete pavement stress by the modulus and thickness of semi-rigid type base. So when the load stress of cement concrete pavement is analyzed, the equivalent modulus of elasticity is obtained by the principles of stress equivalence. 2 tabs, 7 figs, 6 refs.

Key words: road engineering; cement concrete pavement; elastic multi-layer theory; principles of displacement equivalence; principles of stress equivalence; equivalent modulus of elasticity

0 引言

为了简化力学计算,水泥混凝土路面通常被看作半无限均质弹性地基上的薄板。而地基实际上是由不同模量和厚度的基层、底基层或垫层及土基组成的多层体系,因此需要按某物理量等效的原则转

化成当量的半无限均质空间体^[1~3]。

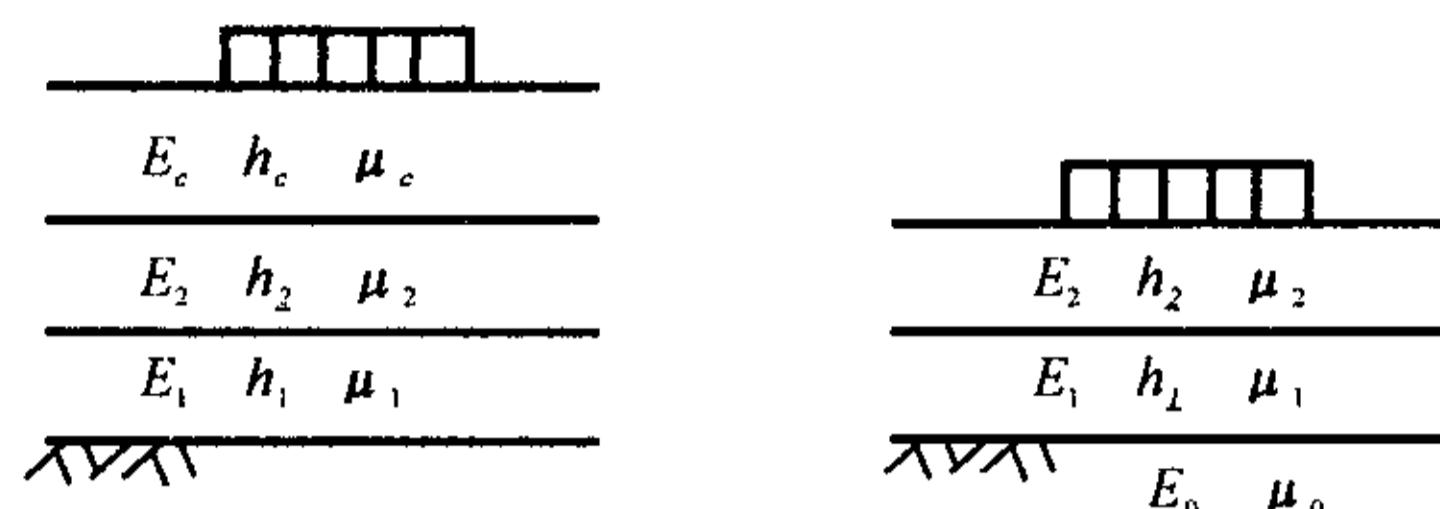
为简化此项工作,本文应用多层弹性体系解,讨论以不同等效指标将多层结构简化为半无限空间体的近似方法,其成果可应用于水泥混凝土路面结构设计时的基层顶面当量模量的计算、路面施工时的基(垫)层的弯沉检测。

收稿日期:2004-04-15

作者简介:蒋应军(1975-),男,浙江兰溪人,长安大学讲师,博士研究生。

1 等效原则

按荷载作用位置不同,有两种等效计算方法:荷载作用于混凝土板的表面(图 1(a))和荷载作用于基层顶面(图 1(b))。按不同物理量为等效指标,有弯沉等效原则和应力等效原则。



(a) 荷载作用于板表面

(b) 荷载作用于基层顶面

图 1 换算模型

按不同等效方法和等效原则计算,层状结构当量回弹模量换算结果差异很大。因此,应根据不同的使用目的和要求,采用不同等效原则和方法进行换算。众所周知,水泥混凝土路面结构设计方法是以板底拉应力为控制指标,因此,对于水泥混凝土路面荷载应力分析而言,为了能够较真实地反映板下地基的力学行为,理想的方法是采用图 1(a)的模型,按板底拉应力等效原则建立换算关系。由于弯沉测定简单易行,通常路面施工检测采用弯沉指标,故对于施工质量控制而言,宜采用弯沉为等效指标建立换算关系,换算模型为图 1(b)。另外,还可建立以图 1(a)模型的板底弯沉等效为原则的当量回弹换算方法,这种方法能较好模拟荷载作用下板底的地基弯沉特点,但是由于不便于测量,且与水泥混凝土路面的设计指标没有直接联系,因而实用价值不大。因此本文仅讨论以板底拉应力等效和荷载作用于基层顶面的弯沉等效为指标,将 3 层体系或者 2 层体系转化成均质体系,得到相应的当量回弹模量 E_t 值^[4]。

2 2 层结构的换算

2.1 弯沉等效为指标的当量回弹模量

2.1.1 影响因素分析

(1) 荷载半径。荷载板直径的大小是影响水泥混凝土路面基层顶面当量回弹模量取值的重要因素。Kelley 和 Teller 与 Sutherland 曾采用不同直径的承载板确定地基反应模量 k 值,结果发现 k 值受板直径的影响:直径越小, k 值越大;但直径大于 76 cm 时, k 值变化较小。为此, Winkler 地基规定以 76 cm 的承载板为标准。对于均质弹性半空间地基,计算结果表明, E_t 不随荷载作用半径变化而变化。而对于层状结构的弹性半空间体, E_t 随荷载作

用半径变化而变化,其变化规律如图 2 所示。

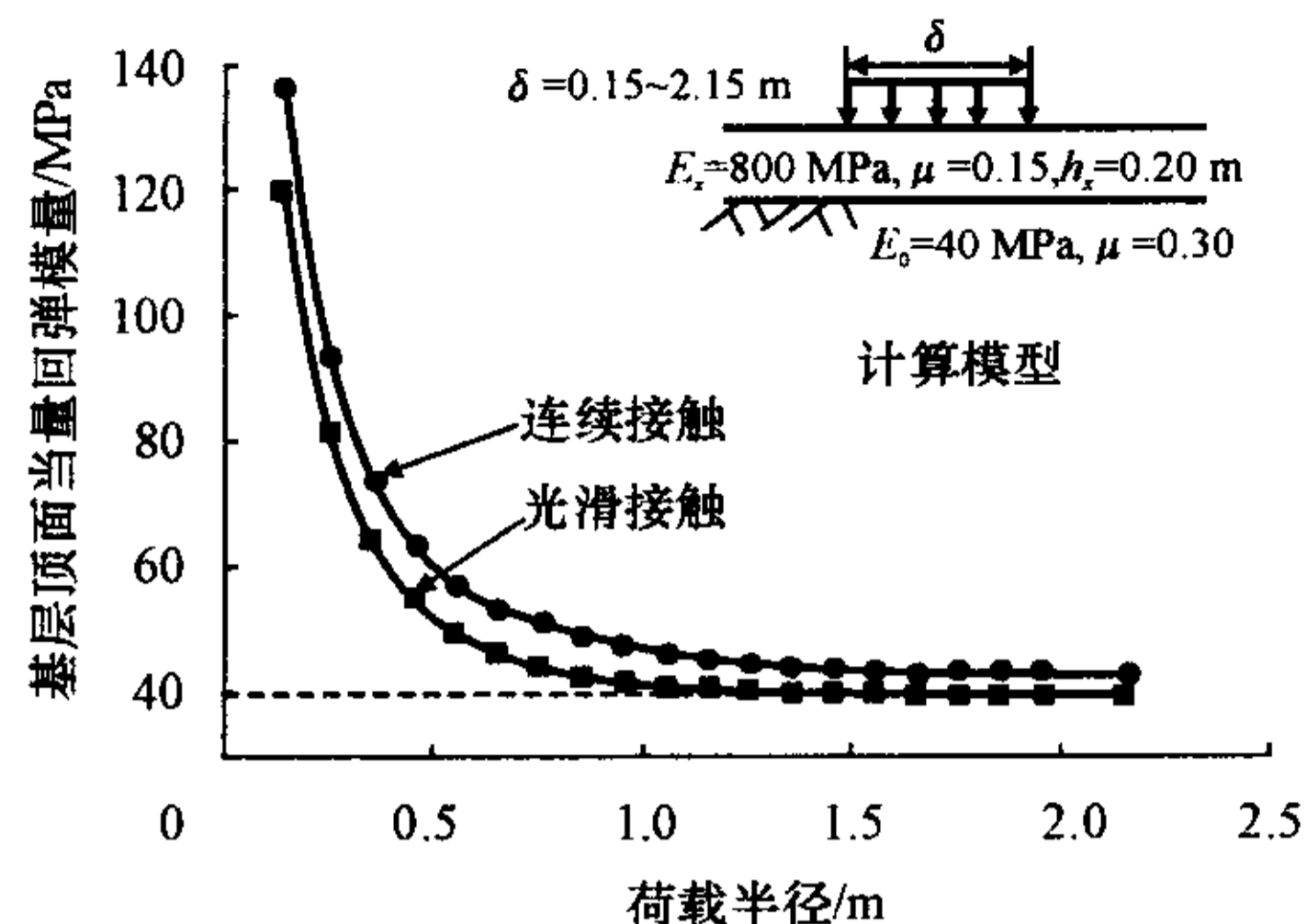


图 2 荷载半径对层状体系模量反算结果的影响

由图 2 可知,计算时不同荷载作用半径对 E_t 值反算有一定的影响,荷载作用半径越小, E_t 值越大;但当荷载作用半径大于 1.0 m 时, E_t 值基本上趋于稳定。现行土基回弹模量测定,通常用车轮的轮印当量圆半径作为承载板的半径,即取 15 cm。因此讨论半径为 15 cm 荷载作用于基层顶面的当量回弹模量的计算方法,对施工检测有实用价值。

(2) 板下地基受力特性。为了合理确定荷载作用半径取值问题,有必要对水泥混凝土路面板下地基的受力特性进行分析。为此,取 $E_t=50$ MPa、100 MPa、200 MPa、300 MPa,水泥混凝土板厚为 20 cm,模量为 30 000 MPa 进行板底反力与弯拉应力计算,荷载 50 kN,作用半径 0.15 m,结果见图 3。

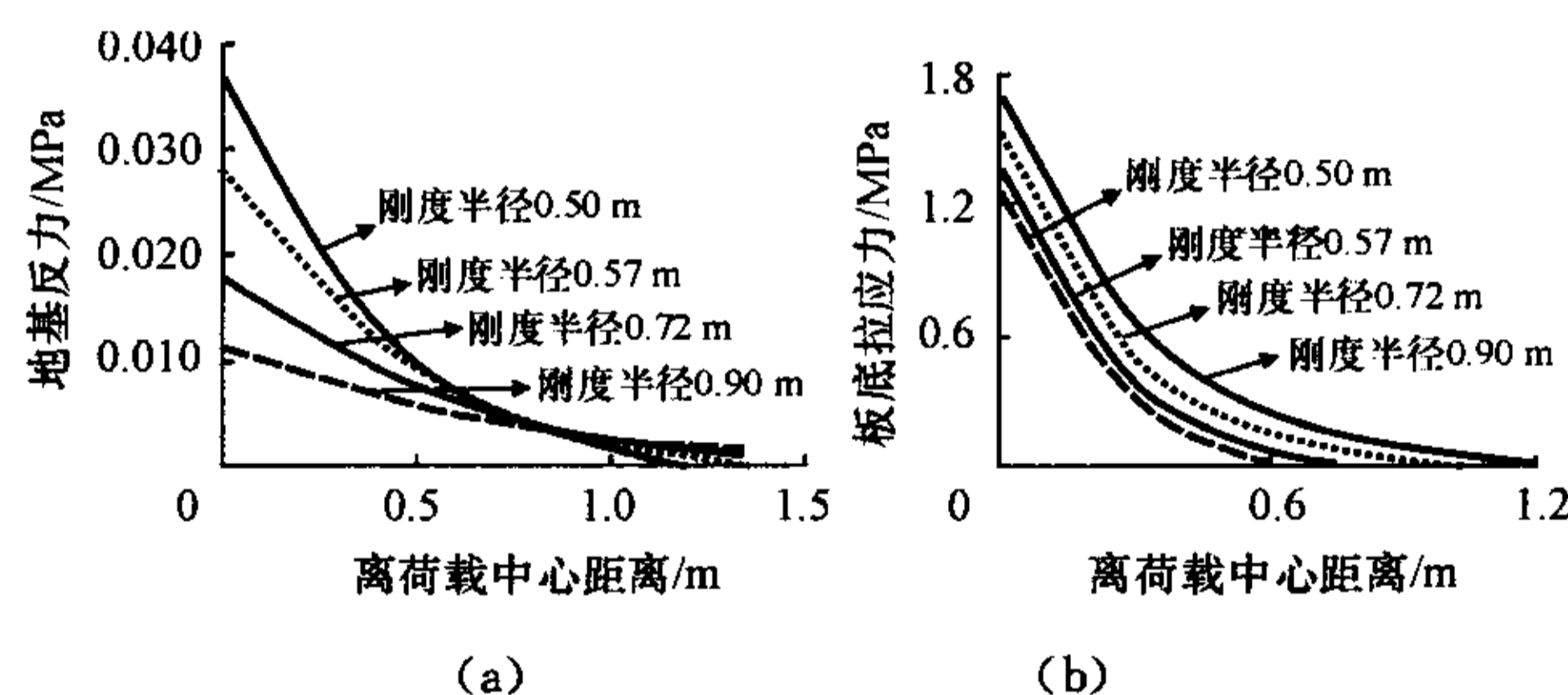


图 3 地基反力及板底应力分布图

由图 3 可知,随着混凝土板的相对刚度半径的减小,板的地基反力和板底弯拉应力分布范围也逐渐减小。由图 3(a)可知,地基反力基本上呈钟型分布,且随刚度半径的减小,地基反力峰值增大,产生地基反力的范围减小;由图 3(b)可看出,板底弯拉应力分布范围基本上同板的相对刚度半径一致。不同的路面结构,板的相对刚度半径是不同的。由此可见,15 cm 的荷载作用半径不能很好地模拟板下地基的实际受力特性,当用于水泥混凝土路面结构设计时,必然存在较大的误差。

为了对比,并考虑到离荷载中心大约在 0.85 m,地基反力有一个相对稳定值,如图 3(a)所示;另外,由图 2 可知,在荷载半径大约为 0.85 m 时,模量

反算结果趋于相对稳定值。而且,目前中国水泥混凝土路面结构相对刚度半径一般也在 0.85 m 左右变化,因此,本文还讨论了荷载计算半径取 0.85 m 时的当量回弹模量换算方法。

(3)接触条件。基层与地基的接触状况较为复杂,与基层材料类型、组成及使用过程等因素有关。基层通常采用无机结合料稳定粒料类材料,粒料占 70% 以上,表面较为粗糙;半刚性基层或底基层在碾压过程中,水泥或二灰砂浆会渗入土基一定深度,加上土基表面存在凹凸不平和孔隙,使得基层与土基结合较为紧密。这会使基层与土基之间的啮合作用加强,从而使得层间具有良好的结合性能。但当基层或底基层粒料含量较少,或当地昼夜温差较大而混凝土面层尚未浇注时,这种啮合作用将会逐渐衰减。一旦面层浇注完毕,由于混凝土板刚度较大,半刚性基层或底基层所受拉应力较小,同时板隔温作用使得基层温度变化较小。因此,层间结合状况基本上趋于稳定。所以实际上基层与土基的层间接触状况应该在连续与滑动之间变化,且较接近于连续状态。

假设基层与土基接触为完全光滑接触,由图 2 可看出,采用层间完全光滑的接触状况进行当量回弹模量换算时,当荷载半径大于 1.2 m 时,出现换算当量回弹模量小于土基模量,显然与实际情况不符。因此,在层间接触条件上考虑采用完全连续条件分析,并与光滑接触条件下换算关系进行对比。

2.1.2 计算模型及参数取值

为使计算不失一般性,选取现有水泥混凝土路面结构形式及结构层参数,并将基层和底基层或者垫层转化成当量单层结构后,按双层体系进行弯沉计算。计算时,采用层间连续接触和光滑接触条件,基层顶面作用荷载 100 kN,半径分别 15 cm 和 85 cm 两种圆形均布荷载,转化后双层体系结构计算参数取值如图 4 所示。

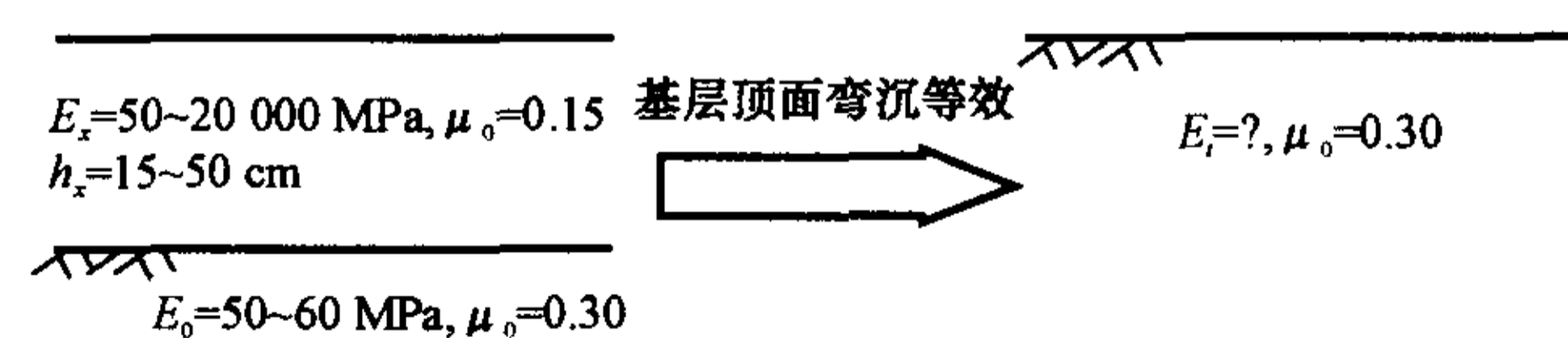


图4 转化模型及计算参数取值

2.1.3 当量回弹模量公式

由于材料泊松比变化很小,对弯沉影响也很小,故忽略不计。因此, E_t 仅是土基回弹模量值 E_0 以及其上当量结构层的模量 E_x 和厚度 h_x 的函数,以弯沉等效为原则即可建立起的函数关系式为

$$\frac{E_t}{E_0} = \frac{w_0}{w_t} = f(h_x, \frac{E_x}{E_0}) \quad (1)$$

式中: w_0, w_x 为均质半无限空间体模量为 E_t, E_0 所对应的弯沉值。

显然, $f(h_x, \frac{E_x}{E_0})$ 应满足下列边界条件

$$f(h_x, \frac{E_x}{E_0}) \geq 1.0 \quad (2)$$

$$\frac{E_x}{E_0} = 1 \text{ 时, } f(h_x, \frac{E_x}{E_0}) = 0 \quad (3)$$

$$h_x = 0 \text{ 时, } f(h_x, \frac{E_x}{E_0}) = 0 \quad (4)$$

当 $h_x = 0$ 时, $E_x/E_0 = 1$, 因此边界条件式(3)、式(4)可以合并为 1 个式,即为式(3)。在回归分析过程中,难以严格满足上述边界条件,但是作为工程应用,拟合数据结果是主要的,至于上述边界条件可以适当放宽。据此,应用 SPSS 统计分析软件回归出下列双层体系当量回弹模量的计算式。

(1)荷载作用半径为 85 cm,

连续接触

$$\frac{E_t}{E_0} = 1.1455 \left[1 - \left(\frac{E_x}{E_0} \right)^{-0.4} \right] \left(\frac{E_x}{E_0} \right)^{1/3} h_x + \left[1.07 \left(\frac{E_x}{E_0} \right)^{-0.36} - 0.07 \right] \left(\frac{E_x}{E_0} \right)^{1/3} \quad (5)$$

光滑接触

$$\frac{E_t}{E_0} = 1.1607 \left[1 - \left(\frac{E_x}{E_0} \right)^{-0.3} \right] \left(\frac{E_x}{E_0} \right)^{1/3} h_x + \left[1.026 \left(\frac{E_x}{E_0} \right)^{-0.43} - 0.026 \right] \left(\frac{E_x}{E_0} \right)^{1/3} \quad (6)$$

(2)荷载作用半径为 15 cm,

$$\frac{E_t}{E_0} = A h_x^B \left(\frac{E_x}{E_0} \right)^{1/3} \quad (7)$$

连续接触

$$A = \left[0.17 + 0.83 \left(\frac{E_0}{E_x} \right)^{0.76} \right]^{-1} \quad (8)$$

$$B = 1 - 1.45 \left(\frac{E_x}{E_0} \right)^{-0.5}$$

光滑接触

$$A = \left[0.18 + 0.82 \left(\frac{E_0}{E_x} \right)^{0.76} \right]^{-1} \quad (9)$$

$$B = 1 - 1.21 \left(\frac{E_x}{E_0} \right)^{-0.55}$$

2.2 板底弯拉应力为等效指标的当量回弹模量

2.2.1 影响因素分析

(1)荷载半径。不同荷载半径作用下板底产生拉应力是不同的,由于混凝土路面承受车轮荷载的

作用,因此,可以用轮印的当量圆半径来表示荷载半径,通常情况下轮印当量圆半径变化很小,一般为 15 cm 左右。

(2)板的相对刚度半径。水泥混凝土路面结构相对刚度半径对板底拉应力有着显著的影响。如图 3(b)所示,随着路面结构相对刚度半径的减小,板底承受拉应力范围及最大拉应力值都随着变小。由此必然导致层状结构模量换算值的变化。

(3)接触状况。通常假设混凝土板与地基光滑接触,因此本文在计算分析时,也引用这一假设。此处所讨论的接触状况仅为基层与土基的情况。计算表明,基层与土基接触状态对板底拉应力的影响相对较小,两者差别一般不大于 2.0%。并由前述分析可知,土基与基层接触较接近于连续状况。因此,在建立以板底拉应力等效的当量模量换算关系时,采用连续接触状况进行分析。

2.2.2 计算模型及参数取值

在计算时,板与基层采用层间光滑接触条件,基层与土基为完全连续接触。作用水泥混凝土路面板的荷载为半径 15 cm,压强 0.70 MPa 的均布荷载,转化模型及计算参数取值如图 5 所示。

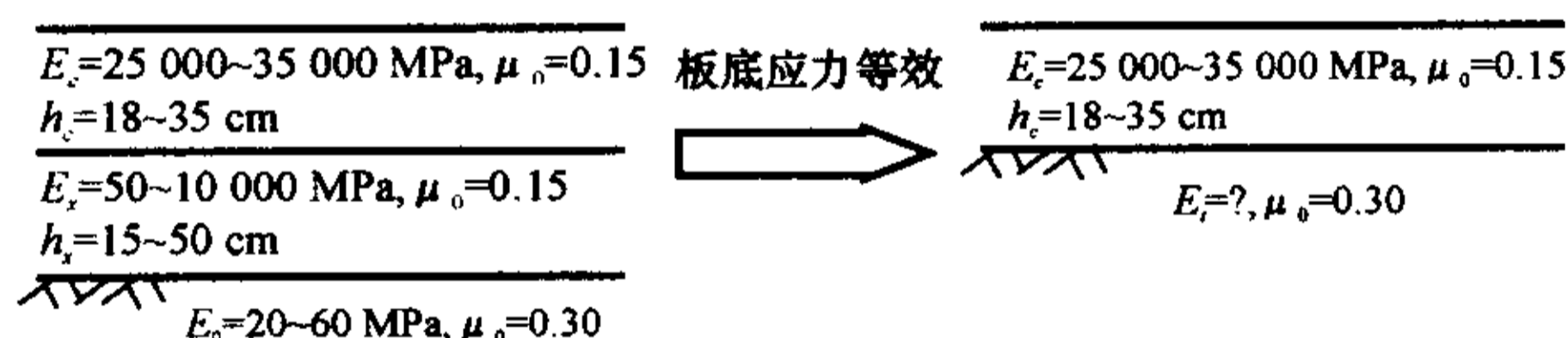


图 5 转化模型及计算参数取值

2.2.3 当量回弹模量公式

根据图 5 计算参数,通过大量的计算,并根据板底应力等效原则,导出下列 2 层体系当量回弹模量的计算式

$$E_t = 1.883 2\alpha_0 (7 - E_x^{0.2}) \exp[0.102h_x \cdot (E_x^{0.565} - 6.832)] E_0^{0.5} \quad (10)$$

式中: $1/\alpha_0 = 0.537h_c \left(\frac{E_c}{E_0}\right)^{1/3}$

由于混凝土面层弹性模量取值范围变动较小,一般在 2 700~33 000 MPa 之间,对换算造成误差不大,因而可取 $E_c = 30 000$ MPa 代入式(10),得到

$$E_t = \frac{0.113}{h_c} (7 - E_x^{0.2}) \exp[0.102h_x \cdot (E_x^{0.565} - 6.832)] E_0^{2/3} \quad (11)$$

3 3 层结构的换算

3 层结构的换算见图 6。首先将基层和底基层(或垫层)两结构层按当量弯曲刚度换算成厚度为 h_x 、模量为 E_x 的当量单层结构^[1,3]。

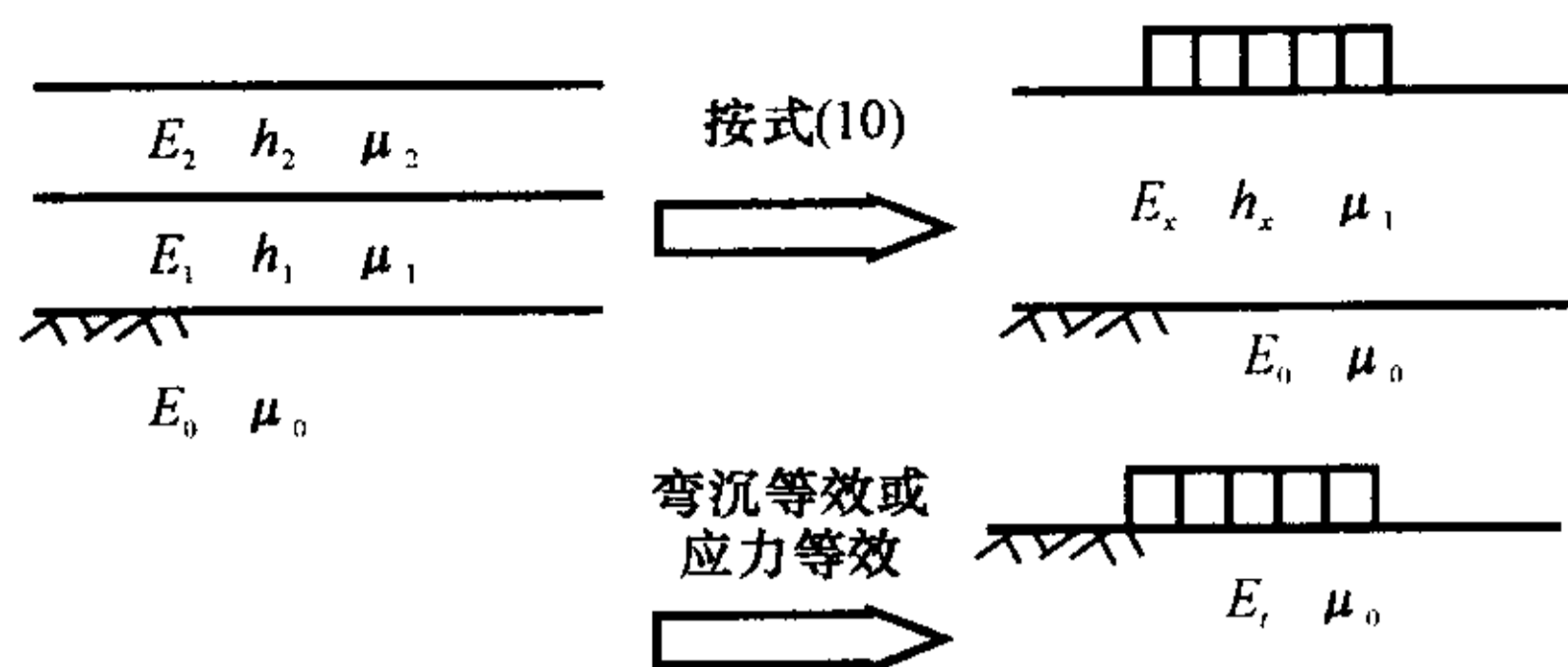


图 6 3 层结构换算

$$E_x = \frac{E_1 h_1^2 + E_2 h_2^2}{h_1^2 + h_2^2} \quad (12)$$

$$h_x = \left(\frac{12D_x}{E_x}\right)^{1/3} \quad (13)$$

$$D_x = \frac{E_1 h_1^3 + E_2 h_2^3}{12} + \frac{h_1 + h_2}{4} \left(\frac{1}{E_1 h_1} + \frac{1}{E_2 h_2}\right)^{-1} k_u \quad (14)$$

式中: h_1, h_2 为基层和底基层(或垫层)厚度; E_1, E_2 为基层和底基层(或垫层)回弹模量; k_u 为基层底基层间接触状况系数,层间连续 $k_u = 1$,层间滑动 $k_u = 0$ 。

然后,按上述相应等效原则下,2 层结构顶面当量模量 E_t 的近似计算式进行求解。3 层结构的基层、底基层结构换算成的当量结构层弹性模量 E_x 的物理意义为,以层厚的平方为加权的基层、底基层结构弹性模量的平均值;参数 D_g 是不计结构层压缩和剪切变形(薄板假设)的 1、2 层结构的总刚度^[1];当量结构层的层厚 h_x 是在假设当量结构层不计结构层压缩和剪切变形的刚度与基层、底基层结构的总刚度 D_g 相同的条件下导出的。这种换算方法物理意义明确,外延性好,精度也较高。

4 公式的验证和比较

4.1 基于弯沉等效的换算公式的验证

为了比较和验证式(5)、式(6)、式(8)、式(9)精度和可靠性,表 1 列出在连续和光滑接触状态下 3 层结构的大量计算结果,并分别与弹性层状解做了比较。弹性层状解系直接按 3 层结构计算弯沉值 w_t ,然后计算 $E_t = \frac{2p\delta(1-\mu_0^2)}{w_t}$ 得当量回弹模量。

由表 1 中计算结果可知,式(5)、式(6)、式(8)、式(9)的换算结果基本上都接近于弹性层状理论解的结果,两者误差一般不超过 5.0%,这说明,按当量弯曲刚度法转化为当量单层结构层后,再按双层弹性体系理论解的回归公式,确定均质体的当量回弹模量是可行的。

4.2 基于拉应力等效的换算公式的验证

为了验证拉应力等效的当量回弹模量换算方法

的可靠性和精度,表 2 给出了大量的水泥混凝土路面结构下的应力计算结果。作为比较的基准,表 2 还给出了直接按层状弹性理论计算的不同结构下的板底拉应力值^[5,6]。

表 1 基于弯沉等效的基层顶面当量回弹模量值

计算参数					层间连续状态						层间光滑接触					
E_0 / MPa	E_1 / MPa	h_1 / cm	E_2 / MPa	h_2 / cm	荷载半径 85 cm			荷载半径 15 cm			荷载半径 85 cm			荷载半径 15 cm		
					层状解	式(5)	误差	层状解	式(8)	误差	层状解	式(6)	误差	层状解	式(9)	误差
30	200	0.20	—	—	33.9	33.4	-1.5	68.6	76.1	10.9	29.9	29.8	-0.3	60	60	0.0
	400	0.20	150	0.18	41.9	41.0	-2.1	117.7	114.4	-2.8	34.6	35.8	3.5	102	99	-2.9
	800	0.20	500	0.18	49.1	49.0	-0.2	172.6	170.4	-1.3	42.1	42.5	1.0	153	151	-1.3
	1 300	0.18	600	0.20	52.5	52.3	-0.4	199.4	194.1	-2.7	45.1	45.5	0.9	175	173	-1.1
	2 000	0.18	700	0.18	53.7	54.0	0.6	215.0	212.1	-1.3	46.4	47.2	1.7	191	188	-1.6
	3 000	0.18	700	0.18	55.9	55.6	-0.5	233.3	227.0	-2.7	48.0	48.8	1.7	205	203	-1.0
	3 000	0.16	1 300	0.18	57.8	57.9	0.2	245.2	241.6	-1.5	50.5	51.0	1.0	220	217	-1.4
	5 000	0.16	1 300	0.18	60.9	60.0	-1.5	269.2	260.2	-3.3	53.2	53.3	0.2	239	237	-0.8
	10 000	0.16	1 500	0.16	63.8	62.8	-1.6	296.1	289.1	-2.4	56.3	57.0	1.2	264	260	-1.5
50	200	0.20	—	—	54.6	53.7	-1.6	93.2	111.0	19.1	48.7	49.1	0.8	80	84	5.0
	300	0.20	150	0.18	62.6	61.8	-1.3	136.5	140.9	3.2	53.0	55.3	4.3	119	118	-0.8
	700	0.18	250	0.18	68.2	67.5	-1.0	190.6	186.9	-1.9	56.8	59.0	3.9	163	160	-1.8
	800	0.20	500	0.18	74.4	74.0	-0.5	230.5	227.6	-1.3	63.1	64.4	2.1	202	200	-1.0
	1 300	0.18	900	0.18	79.4	80.5	1.4	276.9	277.5	0.2	68.5	69.8	1.9	245	243	-1.2
	1 800	0.18	700	0.18	80.3	80.1	-0.2	287.3	281.0	-2.2	68.3	69.5	1.8	252	248	-1.6
	2 500	0.18	1 300	0.20	90.8	90.7	-0.1	359.7	348.8	-3.0	78.9	79.1	0.3	318	315	-1.3
	3 000	0.18	700	0.18	84.1	83.6	-0.6	323.5	313.2	-3.2	71.4	72.8	2.0	281	278	-1.1
	5 000	0.16	1 300	0.18	90.6	89.8	-0.9	373.7	362.1	-3.1	78.2	78.9	0.9	329	326	-0.9
	10 000	0.16	1 500	0.16	95.0	94.1	-0.9	413.9	407.0	-1.7	82.4	84.0	1.9	365	363	-0.5

表 2 不同等效原则下混凝土板底弯拉应力比较

底基层			E_t/MPa	350		600				900			
			h_1/cm	18		20				18			
基 层			E_2/MPa	800		1 500		2 000		4 000		10 000	
			h_2/cm	20	30	20	30	20	30	16	20	16	20
当量结构层			E_x/MPa	599	681	1 050	1 223	1 300	1 569	2 268	2 613	4 917	5 928
			h_x/cm	36	44	38.1	45.7	36.9	44.0	30.8	33.2	27	29.4
$h_c=20\text{ cm}$	$E_0=30\text{ MPa}$	E_t/MPa	弯沉等效	141	174	188	233	200	251	212	239	248	286
			应力等效	56	79	90	150	103	186	120	168	197	339
		σ/MPa	层状解	1.66	1.58	1.56	1.45	1.53	1.40	1.50	1.43	1.37	1.25
			弯沉等效解	1.46	1.41	1.39	1.34	1.37	1.32	1.36	1.33	1.32	1.29
			应力等效解	1.67	1.59	1.56	1.44	1.53	1.39	1.49	1.41	1.37	1.24
		误差/%	弯沉等效解	13.7	12.1	12.2	8.2	11.7	6.1	10.3	7.5	3.8	-3.1
	应力等效解		-0.6	-0.6	0.0	0.7	0.0	0.7	0.7	1.4	0.0	0.8	
	$E_0=50\text{ MPa}$	E_t/MPa	弯沉等效	186	227	251	310	268	336	291	327	345	398
			应力等效	79	112	126	211	144	262	169	237	277	476
		σ/MPa	层状解	1.55	1.49	1.46	1.37	1.44	1.32	1.42	1.36	1.29	1.17
			弯沉等效解	1.39	1.34	1.32	1.27	1.31	1.25	1.29	1.26	1.25	1.21
			应力等效解	1.59	1.51	1.48	1.36	1.45	1.31	1.41	1.33	1.30	1.17
		误差/%	弯沉等效解	-10.3	-10.1	-9.6	-7.3	-9.0	-5.3	-9.2	-7.4	-3.1	3.4
			应力等效解	2.6	1.3	1.4	-0.7	0.7	-0.8	-0.7	-2.2	0.8	0.0
$h_c=30\text{ cm}$		$E_0=40\text{ MPa}$	E_t/MPa	弯沉等效	165	203	221	274	236	296	253	285	299
	应力等效			46	64	73	122	83	151	97	136	160	274
	σ/MPa		层状解	0.84	0.823	0.818	0.790	0.811	0.777	0.804	0.785	0.772	0.737
			弯沉等效解	0.73	0.71	0.701	0.678	0.694	0.670	0.686	0.674	0.668	0.653
			应力等效解	0.864	0.83	0.817	0.763	0.803	0.741	0.787	0.752	0.735	0.678
	误差/%		弯沉等效解	-13.1	-13.7	-14.3	-14.2	-14.4	-13.8	-14.7	-14.1	-13.5	-11.4
		应力等效解	2.9	0.9	-0.1	-3.4	-1.0	-4.6	-2.1	-4.2	-4.8	-8.0	

由表 2 中数据可知,基于板底拉应力等效的当量回弹模量的换算公式与层状解相比,当当量结构层模量小于 5 000 MPa 时,计算误差一般不超过 5%,证明该换算方法的精度可满足工程使用要求。

4.3 分析与讨论

为了比较不同等效原则的换算模量值对板底应力计算结果的影响,表 2 给出了基于弯沉等效(荷载半径 15 cm)的当量模量值及其板底应力计算结果。图 7 是土基模量为 30 MPa,基层和底基层当量厚度分别为 20 cm 和 35 cm 时的换算系数(E_t/E_0)。

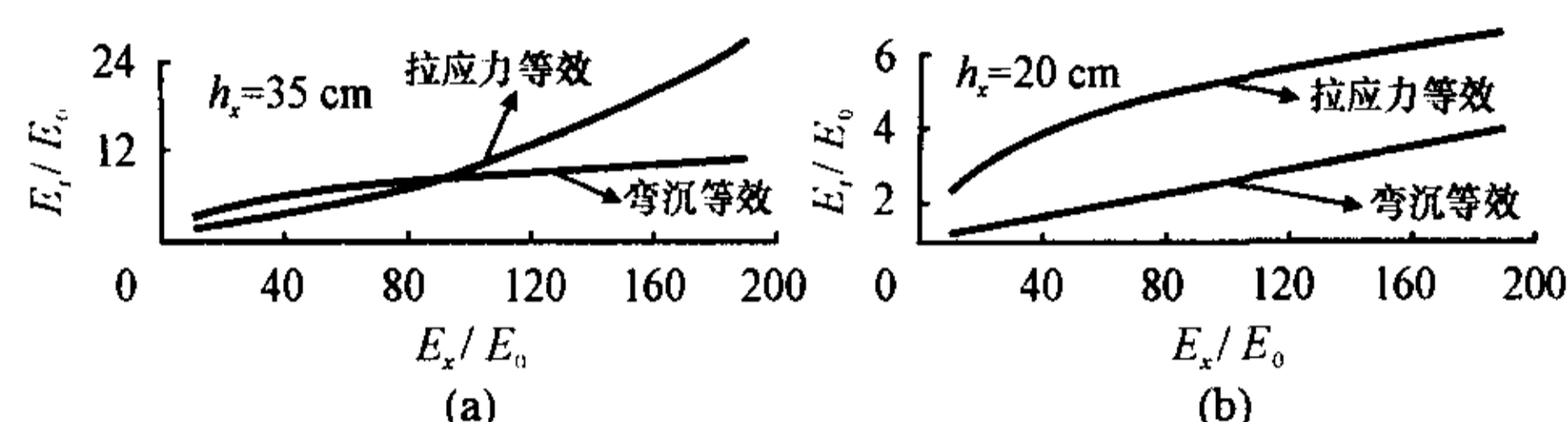


图 7 换算系数比较

由图 7 可看出,基于弯沉等效的当量回弹模量换算系数(E_t/E_0)曲线,随着 E_x/E_0 增大而逐渐趋于平缓,而基于拉应力等效的当量回弹模量换算系数曲线,则随着 E_x/E_0 增大而稳步增长,且随着 h_x 增大, E_x/E_0 增长率越来越大。当 E_x 超过某一定值后,基于拉应力等效的当量回弹模量值将大于基于弯沉等效的模量值。

通过表 2 比较可知,对于常用的水泥混凝土路面结构而言,基于弯沉等效的当量模量值普遍大于拉应力等效的当量模量值,使得板底拉应力计算值明显偏小,从而导致设计结果不安全。

另外,分析基层顶面回弹模量设计值的提高对面层板应力计算结果的影响可知,采用弯沉等效的换算方法时,半刚性基层的刚度和厚度变化对混凝土板底荷载应力的影响很小,而由层状弹性理论解可知,混凝土板底荷载应力值受半刚性基层的刚度和厚度变化影响较大。因而,基于弯沉等效的当量回弹模量换算方法掩盖了半刚性基层的特性。而基于拉应力等效的当量模量换算结果在模量 E_x 不大于 5 000 MPa 时,较接近与层状理论解,由换算引起的板底应力误差一般不大于 5%。因此,在水泥混凝土路面荷载应力分析时,建议采用拉应力等效的当量回弹模量换算公式。

5 结 语

通过大量的计算,给出了基于弯沉等效和应力等效的层状结构当量模量近似计算方法,并验证了

方法的可靠性。弯沉等效的当量模量换算方法可用于路面施工检测弯沉,但是不能很好模拟板底地基受力特性;用于水泥混凝土路面荷载应力分析时,不能很好反映半刚性基层的刚度和厚度变化对混凝土板底荷载应力的影响,由此导致板底应力计算结果偏差较大。为此,根据板底拉应力等效的方法导出了基层顶面当量模量换算方法,较为真实地反映了半刚性基层的特性,因此在计算荷载应力时,宜采用该法。

参考文献:

References:

- [1] 谈至明. 半结合式双层板弯曲的近似计算[J]. 公路, 2001, (4): 25-26.
TAN Zhi-ming. Simplified calculation of bi-layer plate bending with semi-continue condition[J]. Highway, 2001, (4): 25-26.
- [2] 谈至明, 姚祖康, 刘伯莹. 层状结构顶面当量模量的近似计算[J]. 公路, 2003, (8): 5-8.
TAN Zhi-ming, YAO Zu-kang, LIU Bo-ying. Approximate calculation of equivalent modulus of end face of layered structures[J]. Highway, 2003, (8): 5-8.
- [3] 姜爱锋, 姚祖康. 路面结构中地基顶面当量回弹模量的换算[J]. 同济大学学报, 2001, (5): 536-540.
JIANG Ai-feng, YAO Zu-kang. Calculation of surface equivalent modulus subgrade in the pavement structure[J]. Journal of Tongji University, 2001, (5): 536-540.
- [4] 毛雪松, 支喜兰. 强度随龄期增长的半刚性基层弯沉检测方法[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2003, 23(2): 37-40.
MAO Xue-song, ZHI Xi-lan. Checking method of construction deflection of semi-rigid base[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2003, 23(2): 37-40.
- [5] 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): 12-15.
ZHA Xu-dong. Summary of backcalculation methods of pavement layer moduli[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2002, 2(4): 12-15.
- [6] 武和平. 水泥混凝土路面设计土基回弹模量建议值的修正系数研究[J]. 中国公路学报, 1998, 11(4): 1-10.
WU He-ping. Research on the revised coefficient of the recommended value for earth subgrade rebound modulus in the design of rigid pavement[J]. China Journal of Highway and Transport, 1998, 11(4): 1-10.