

文章编号: 1002-0268 (2005) 05-0038-05

基层顶面当量回弹模量换算新方法

蒋应军¹, 侯传岭², 秦宪峰², 陈忠达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. 开封市公路管理局, 河南 开封 475000)

摘要: 指出现行水泥混凝土路面设计规范中基层顶面当量回弹模量换算方面存在不足, 在大量计算分析基础上, 回归出了精度和外延性更高的基层顶面当量回弹模量换算公式。

关键词: 水泥混凝土路面; 当量回弹模量; 换算公式

中图分类号: U416.216

文献标识码: A

Calculation Method of Composite Resilient Modulus of Foundation Under Cement Concrete Pavement

JIANG Ying-jun¹, HOU Chun-ling², QIN Xian-feng², CHEN Zhong-da¹

(1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Shaanxi Xi'an 710064, China;
2. Highway Administration Bureau of Kaifeng, Henan Kaifeng 475000, China)

Abstract: The deficiencies in the calculation method of composite resilient modulus of foundation in present specification of cement concrete pavement design for highway was analyzed. Based on the analysis of great amount of computing data, the new calculation method of composite resilient modulus of foundation was established.

Key words: Cement concrete pavement; Composite resilient modulus; Calculation method

0 前言

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(弯沉或应力)等效原则转化成当量的半无限均质空间体。应用多层弹性体系解进行基层顶面当量回弹模量的换算, 需采用电算软件。为简化此项工作, 现行混凝土路面设计规范把 3 层体系中路基以上两结构层按当量弯曲刚度法转化为当量单层结构层, 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。然而, 在规范应用过程中发现, 双层弹性体系理论解的回归公式仅适用于 E_x/E_0 较低情况, 否则换算误差较大, 甚至出现

异常情况, 即换算系数出现小于 1 和 0, 这是不合理也不可能有的。为此本文对双层弹性理论解的回归公式作进一步分析, 并通过大量计算分析, 进而回归出了精度更高、外延性更强的当量回弹模量计算公式。

1 现行当量回弹模量换算公式

现行当量回弹模量换算方法, 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。

$$E_x = \frac{E_1 h_1^2 + E_2 h_2^2}{h_1^2 + h_2^2} \quad (1)$$

$$h_x = \left[\frac{12D_x}{E_x} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

收稿日期: 2004-04-01

作者简介: 蒋应军(1975-), 男, 浙江兰溪人, 博士, 主要从事路基路面工程教学与研究工作。(jyangyingjun2002@163.com)

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

式中, h_1 、 h_2 为基层和底基层 (或垫层) 的厚度; E_1 、 E_2 为基层和底基层 (或垫层) 的回弹模量; D_x 为基层和底基层 (或垫层) 的当量弯曲刚度。

路基以上两层结构层模量转化成单层当量模量后, 3 层弹性体就转化成双层弹性体系, 此时, 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, 即

$$E_t = ah_x^b E_0 \left(\frac{E_x}{E_0} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (4)$$

式中, $a = 6.22 \left[1 - 1.51 \left(\frac{E_x}{E_0} \right)^{-0.45} \right]$
 $b = 1 - 1.44 \left(\frac{E_x}{E_0} \right)^{-0.55}$

对公式 (4) 深入分析发现, 该式对于 $E_x/E_0 \geq 8$ 时应用精度较高。但是如果 $E_x/E_0 < 8$ 时, 随着模量比降低, 误差越来越大; 且当 $E_x/E_0 < 4$ 时, 出现当量回弹模量小于土基模量的反常现象或者当量模量出现负值。为了进一步说明这一点, 可以进行简单的几个算例分析。表 1 系对于同样路面结构, 以 Bisar 程序计算结果为基准, 将规范中的换算结果与它相比较。

表 1 不同路面结构当量回弹模量换算结果比较

路面结构	A	B	C	D
基层(20cm) MPa	80	300	350	500
底基层(20cm) MPa	—	150	150	200
土基 MPa	40	40	40	40
E_x/E_0	2	5.625	6.25	8.75
E_t 规范法	-32	89	98	128
MPa 电算法	47	110	116	137
误差/%	-168	-19	-15.5	-6.6

从表 1 可以看出, 随着 E_x/E_0 值减小, 规范中的当量回弹模量计算误差越来越大。当模量 $E_x/E_0 < 8$ 时, 换算误差达到 20% 以上, 甚至出现当量回弹模量为负值, 这表明规范中当量回弹模量换算回归公式对 $E_x/E_0 < 8$ 时已不再适用, 否则将会使设计结果显得过于保守和不合理。随着公路等级的提高和高模量基层的大量使用, E_x/E_0 值也随之有所增大, 但是在目前干线公路上出现 $E_x/E_0 < 8$ 情况也是常有的, 这就给干线公路水泥混凝土路面设计带来了极大的误差。因此, 有必要对双层弹性体系理论解重新进行回归, 解决 $E_x/E_0 < 8$ 时的换算问题, 并尽量提高换算精度。

2 建议采用的当量回弹模量换算公式

本文采用 BISAR3.0 程序进行弯沉计算。为使计算不失一般性, 选取大量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, 采用层间连续接触条件, 体系表面作用半径 15cm 压强 0.7MPa 的圆形均布荷载, 转化后双层体系结构计算参数取值如图 1 所示。

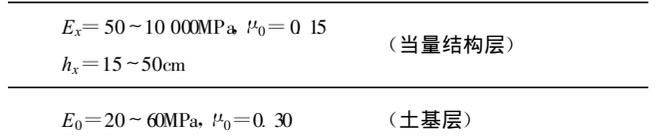


图 1 两层弹性地基体系结构示意图

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这样的函数关系。

$$\frac{E_t}{E_0} = \frac{w_0}{w_t} = \frac{w_0}{w_0 \left[1 - f \left(h_x, \frac{E_x}{E_0} \right) \right]} = \frac{1}{1 - f \left(h_x, \frac{E_x}{E_0} \right)} \quad (5)$$

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

函数 $f \left(h_x, \frac{E_x}{E_0} \right)$ 反映了上层结构对减小弯沉的贡献。显然, $f \left(h_x, \frac{E_x}{E_0} \right)$ 应满足下列边界条件

$$0 \leq f \left(h_x, \frac{E_x}{E_0} \right) < 1.0 \quad (1)$$

$$\frac{E_x}{E_0} = 1 \text{ 时, } f \left(h_x, \frac{E_x}{E_0} \right) = 0 \quad (2)$$

对弯沉计算结果按式 (5) 进行了整理分析。在回归分析过程中, 发现函数 $f \left(h_x, \frac{E_x}{E_0} \right)$ 难以严格满足边界条件②, 但是作为工程应用, 拟合数据结果是主要的, 上述边界条件可以适当放宽。因此, 考虑与规范表达形式一致性, 导出下列双层体系当量回弹模量的计算式, 即

$$E_t = Ah_x^B E_0 \left(\frac{E_x}{E_0} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (6)$$

当量结构层与土基为光滑接触:

$$\left. \begin{aligned} A &= \left[0.18 + 0.82 \left(\frac{E_0}{E_x} \right)^{0.76} \right]^{-1} \\ B &= 1 - 1.21 \left(\frac{E_x}{E_0} \right)^{-0.55} \end{aligned} \right\} \quad (6.1)$$

当量结构层与土基为连续接触:

$$\left. \begin{aligned} A &= \left[0.17 + 0.83 \left(\frac{E_0}{E_x} \right)^{0.76} \right]^{-1} \\ B &= 1 - 1.45 \left(\frac{E_x}{E_0} \right)^{-0.5} \end{aligned} \right\} \quad (6.2)$$

土基为光滑接触的基础上经大量计算分析而得到的, 现行水泥混凝土路面设计规范采用了公式 (4)。为了比较和验证公式 (6.1)、公式 (4) 的精度和可靠性, 表 2 和表 3 分别列出了双层结构和 3 层结构的大量计算结果, 并分别与弹性层状解做了比较。弹性层状解采用 Bisar 程序直接按双层或 3 层结构计算弯沉值 w_t ,

然后按式 $E_t = \frac{2(1-\mu_t^2)p\delta}{w_t}$ 计算而得当量回弹模量。

3 当量回弹模量公式的比较与验证

3.1 公式 (6.1)、公式 (4) 与弹性层状解的比较

公式 (6.1) 和公式 (4) 都是假设当量结构层与

表 2 不同计算方法下双层结构基层顶面当量回弹模量值比较

E_0 MPa	E_x MPa	$\frac{E_x}{E_0}$	$h_x=20\text{cm}$ 时当量模量值					$h_x=40\text{cm}$ 时当量模量值				
			层状解 /MPa	公式(4) /MPa	误差 /%	公式(6.1) /MPa	误差 /%	层状解 /MPa	公式(4) /MPa	误差 /%	公式(6.1) /MPa	误差 /%
30	200	6.7	60	57	-5.0	60	0.0	88	80	-9.1	89	1.1
	250	8.3	65	65	0.0	65	0.0	99	95	-4.0	100	1.0
	300	10.0	70	72	2.9	69	-1.4	109	108	-0.9	110	0.9
	350	11.7	74	77	4.1	73	-1.4	117	119	1.7	118	0.9
	400	13.3	78	82	5.1	77	-1.3	126	129	2.4	126	0.0
	500	16.7	84	90	7.1	84	0.0	139	145	4.3	140	0.7
	600	20.0	90	96	6.7	90	0.0	152	159	4.6	153	0.7
	700	23.3	96	102	6.3	95	-1.0	163	171	4.9	164	0.6
	800	26.7	100	107	7.0	100	0.0	174	182	4.6	174	0.0
	900	30.0	104	112	7.7	104	0.0	182	191	4.9	183	0.5
	1000	33.3	109	116	6.4	108	-0.9	191	200	4.7	191	0.0
	2000	66.7	138	147	6.5	138	0.0	254	266	4.7	254	0.0
	3000	100.0	161	169	5.0	159	-1.2	299	312	4.3	297	-0.7
	4000	133.3	177	186	5.1	175	-1.1	334	347	3.9	331	-0.9
	5000	166.7	191	200	4.7	189	-1.0	363	377	3.9	359	-1.1
	6000	200.0	204	213	4.4	200	-2.0	389	404	3.9	383	-1.5
7000	233.3	214	224	4.7	211	-1.4	412	427	3.6	405	-1.7	
8000	266.7	223	235	5.4	220	-1.3	432	448	3.7	424	-1.9	
50	200	4	80	56	-34.0	85	6.3	110	69.7	-36.6	114	3.6
	250	5	88	74	-18.0	91	3.4	125	98.3	-21.4	128	2.4
	300	6	95	87	-9.2	96	1.1	138	121	-12.3	141	2.2
	350	7	101	98	-3.9	102	1.0	150	139	-7.3	153	2.0
	400	8	107	106	-0.5	107	0.0	162	154	-4.9	163	0.6
	500	10	116	120	3.4	116	0.0	182	180	-1.1	183	0.5
	600	12	124	130	5.3	124	0.0	198	202	2.0	200	1.0
	700	14	132	139	6.3	131	-0.8	214	220	2.8	215	0.5
	800	16	138	147	6.8	138	0.0	228	237	3.9	229	0.4
	900	18	145	154	7.1	144	-0.7	241	251	4.1	242	0.4
	1000	20	150	160	7.2	150	0.0	253	265	4.7	254	0.4
	2000	40	193	206	6.9	192	-0.5	344	361	4.9	345	0.3
	3000	60	223	236	6.5	222	-0.4	407	426	4.7	406	-0.2
	4000	80	247	261	6.3	245	-0.8	456	477	4.6	455	-0.2
	5000	100	267	281	6.2	265	-0.7	498	519	4.2	495	-0.6
	6000	120	284	299	6.2	281	-1.1	534	556	4.1	530	-0.7
7000	140	300	315	6.2	296	-1.3	567	590	4.1	561	-1.1	
8000	160	314	329	6.2	310	-1.3	597	620	3.9	589	-1.3	

表 3 不同计算方法下 3 层结构基层顶面当量回弹模量值比较

计算参数					当量结构层参数			基层顶面当量回弹模量值与误差				
E_0 MPa	E_1 MPa	h_1 /cm	E_2 /MPa	h_2 /cm	E_x /MPa	h_x /cm	$\frac{E_x}{E_0}$	层状解 /MPa	公式(4) /MPa	误差 /%	公式(6.1) /MPa	误差 /%
30	200	0 20	—	—	200	0 20	6. 7	60	57	- 5 0	60	0. 0
	400	0 20	150	0. 18	288	0 35	9. 6	102	98	- 3 9	99	- 2 9
	800	0 18	250	0. 18	525	0 33	17. 5	127	131	3 1	125	- 1. 6
	800	0 20	500	0. 18	666	0 37	22. 2	153	158	3 3	151	- 1. 3
	1300	0 20	300	0. 20	800	0 36	26. 7	161	166	3 1	158	- 1. 9
	1300	0 18	600	0. 20	913	0 37	30. 4	175	182	4 0	173	- 1. 1
	1300	0 18	900	0. 18	1100	0 36	36. 7	184	190	3 3	181	- 1. 6
	2000	0 18	300	0. 20	1061	0 32	35. 4	166	174	4 8	165	- 0. 6
	2000	0 18	700	0. 18	1350	0 34	45. 0	191	198	3 7	188	- 1. 6
	2000	0 16	1300	0. 18	1609	0 34	53. 6	204	212	3 9	202	- 1. 0
	3000	0 18	300	0. 20	1508	0 31	50. 3	182	190	4 4	180	- 1. 1
	3000	0 18	700	0. 18	1850	0 32	61. 7	205	214	4 4	203	- 1. 0
	3000	0 16	1300	0. 18	2050	0 33	68. 3	220	229	4 1	217	- 1. 4
	5000	0 18	300	0. 20	2403	0 29	80. 1	203	213	4 9	202	- 0. 5
	5000	0 18	700	0. 18	2850	0 30	95. 0	226	236	4 4	224	- 0. 9
	5000	0 16	1300	0. 18	2933	0 31	97. 8	239	249	4 2	237	- 0. 8
10000	0 16	1500	0. 16	5750	0 27	191. 7	264	275	4 2	260	- 1. 5	
50	200	0 20	—	—	200	0 20	4. 0	80	56	- 30 0	84	5. 0
	300	0 20	150	0. 18	233	0 37	4. 7	119	86	- 27 7	118	- 0. 8
	700	0 18	250	0. 18	475	0 34	9. 5	163	158	- 3 1	160	- 1. 8
	800	0 20	500	0. 18	666	0 37	13. 3	202	204	1 0	200	- 1. 0
	1200	0 18	600	0. 20	869	0 37	17. 4	230	235	2 2	226	- 1. 7
	1300	0 18	900	0. 18	1100	0 36	22. 0	246	255	3 7	243	- 1. 2
	1500	0 16	1300	0. 18	1388	0 34	27. 8	261	272	4 2	259	- 0. 8
	1800	0 18	700	0. 18	1250	0 34	25. 0	252	261	3 6	248	- 1. 6
	2000	0 18	300	0. 20	1061	0 32	21. 2	225	234	4 0	222	- 1. 3
	2500	0 18	1300	0. 20	1837	0 37	36. 7	319	330	3 4	315	- 1. 3
	3000	0 18	700	0. 18	1850	0 32	37. 0	281	293	4 3	278	- 1. 1
	3000	0 16	1300	0. 18	2050	0 33	41. 0	300	313	4 3	297	- 1. 0
	5000	0 18	300	0. 20	2403	0 29	48. 1	279	294	5 4	278	- 0. 4
	5000	0 18	700	0. 18	2850	0 30	57. 0	311	326	4 8	309	- 0. 6
	5000	0 16	1300	0. 18	2933	0 31	58. 7	329	344	4 6	326	- 0. 9
	10000	0 16	1500	0. 16	5750	0 27	115. 0	365	383	4 9	363	- 0. 5

由表 2 和表 3 可知, 公式 (6. 1) 和公式 (4) 的换算结果基本上都接近于弹性层状理论解的结果, 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。从计算误差上来看, 公式 (6. 1) 误差普遍较公式 (4) 的小, 即精度高于公式 (4)。

为了进一步比较公式 (6. 1) 和公式 (4), 分别计算不同 $\frac{E_x}{E_0}$ 下的模量换算系数 $n = \frac{E_t}{E_0} = Ah_x^B \left(\frac{E_x}{E_0} \right)^{\frac{1}{3}}$ 和 $n = \frac{E_t}{E_0} = ah_x^b \left[\frac{E_x}{E_0} \right]^{\frac{1}{3}}$, 计算结果示于图 2。

从图 2 中可以看出, 不管当量结构层厚度 15cm 还是 40cm, 在模量比大于 8 之后, 公式 (4) 的曲线高于公式 (6. 1) 曲线, 即基层顶面当量回弹模量换算值高于公式 (6. 1), 这与表 2 和表 3 中计算结果的

规律一致; 在模量比小于 8 之后, 公式 (4) 曲线急剧下降在模量比 4. 5 附近, 出现换算系数小于 1. 0 情况; 模量比在 2. 5 附近, 出现小于 0 的情况, 这与表

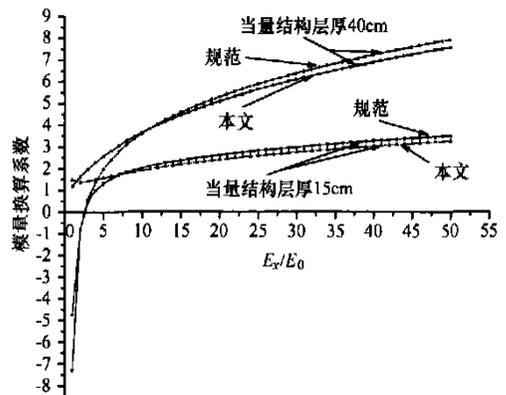


图 2 公式 (6. 1) 和公式 (4) 关于 n 计算结果对比

2和表3中反映误差极大相一致;而公式(6.1)随着模量比减小,曲线始终保持平缓下降,且换算值一直大于1.0,也即避免了模量换算系数 n 出现小于1.0的不合理情况。

3.2 公式(6.2)与弹性层状解的比较

现行规范是假设底基层(或基层)与土基是光滑

表4 公式(6.2)与弹性层状解的比较

E_1/MPa	400	800			1300		3000			5000			10000		
E_2/MPa	150	250	500	200	600	300	800	1500	300	800	1500	300	800	1500	
$E_0=30\text{MPa}$	层状解/MPa	109	141	157	154	180	197	225	249	222	249	274	266	288	311
	公式(6.2)/MPa	108	139	156	150	178	191	220	245	215	242	268	255	277	301
	误差%	-0.5	-1.1	-0.4	-2.7	-1.3	-3.1	-2.1	-1.4	-3.4	-2.7	-2.1	-4.1	-3.8	-3.3
$E_0=50\text{MPa}$	层状解/MPa	143	191	211	210	246	274	312	344	311	348	381	374	405	437
	公式(6.2)/MPa	146	188	211	207	243	267	306	340	302	339	374	360	391	425
	误差%	2.1	-1.6	0.0	-1.4	-1.2	-2.6	-1.9	-1.2	-2.9	-2.6	-1.8	-3.7	-3.5	-2.7

从表4可以看出,公式(6.2)计算结果与弹性层状体系解的结果基本一致,即公式(6.2)可以用于土基与底基层为连续状态时的基层顶面模量换算。

4 结论

(1) 现行混凝土路面设计规范中的基层顶面当量回弹模量公式仅适用于 $E_x/E_0 \geq 8$ 情况,否则应用时出现较大误差,甚至出现当量回弹模量比土基模量还小的反常现象,这是不合理也不可能的。

(2) 应用建议的基层顶面当量回弹模量换算公式(6.1)换算时,不仅避免基层顶面当量回弹模量小于

接触的,因此,也只给出了光滑状态的换算公式。本文在大量计算的基础上,回归出了底基层与土基为连续接触状态的换算公式。为了比较和验证公式的准确性,选取了几组数据进行计算。计算参数为: $E_0=30、50\text{MPa}$, $h_1=0.18\text{m}$, $h_2=0.15\text{m}$,计算结果列于表4。

土基模量的反常现象的出现,具有很强的外延性,且比现行规范的换算结果具有更高的精度。

(3) 本文还给出了土基与底基层为连续状态时的基层顶面模量换算公式(6.2),验算结果表明,同样具有很高的精度。

参考文献:

- [1] JTG D400-2002, 公路水泥混凝土路面设计规范[S].
- [2] 谈至明,等.层状结构顶面当量模量的近似计算[J].公路,2003(8):5-8.
- [3] 姜爱锋,等.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,2001,29(5):536-540.