

HOGG法推算路基承载能力的基本原理 及其在ESPINO公路项目中的应用

高政亮¹ 吕馥宏²

中国中铁股份有限公司玻利维亚分公司

摘要: 为了寻求一种快速准确检验路基成型后承载能力的现场质量控制方法, 本文在分析Hogg法基本原理的基础上, 结合玻利维亚Espino公路项目, 利用Hogg模型及其简化模型对贝克曼弯沉试验得到的数据进行处理, 推算路基材料CBR值和路基回弹模量。

关键词: 路基; 承载能力; 弯沉试验; Hogg法; 贝克曼梁

【DOI】 10.12254/j.issn.2096-6539.2022.01.056

一、Hogg法基本原理

Hogg法基于Hogg-Burmister方法来分析现场测量得到的弯沉盆数据, 采用一系列公式将弯沉盆属性与路基回弹模量建立联系。在此基础上, 建立Hogg简化模型, 将弯沉盆基本参数(最大弯沉和曲线长度因子)与根据Hogg模型计算得到的路基回弹模量直接进行数据拟合, 得到两者之间的单一简易关系式, 以便现场在无数据分析程序的情况下快速利用检测数据得到路基承载能力。

(一) Hogg模型的基本原理

Hogg模型基于一个假定的双层体系, 荷载直接施加于结构表面。该体系通过刚性层设置在弹性介质上组成的双层等效模型来简化典型的多层弹性体系^[4]。Hogg模型由如下公式组成^[5]:

$$E_0 = I \frac{(1+\mu_0)(3-4\mu_0)}{2(1-\mu_0)} \left[\frac{S_0}{S} \right] \left[\frac{p}{\Delta_0 l} \right] \quad (1)$$

$$r_{50} = r \frac{(1/\alpha)^{1/\beta-B}}{\left[\frac{1}{\alpha} \left(\frac{\Delta_0}{\Delta_r} - 1 \right) \right]^{1/\beta-B}} \quad (2)$$

$$l = y_0 \frac{r_{50}}{2} + [(y_0 r_{50})^2 - 4mar_{50}]^{1/2},$$

$$\text{当 } \frac{a}{l} < 0.2, l = (y_0 - 0.2m)r_{50} \quad (3)$$

$$\left(\frac{S_0}{S} \right) = 1 - \bar{m} \left(\frac{a}{l} - 0.2 \right), \text{ 当 } \frac{a}{l} < 0.2, \left(\frac{S_0}{S} \right) = 1 \quad (4)$$

其中:

E_0 为路基弹性模量;

μ_0 为路基材料的泊松系数;

S_0 为点载荷的理论刚度;

S 为路面刚度, $S=p/\Delta_0$;

P 为施加载荷;

Δ 为弯沉, Δ_0 为初始加载点的弯沉, Δ_r 为径向距离 r 处的弯沉;

r 为距初始加载点的径向距离, 此时, Δ_r 接近最大弯沉的一半, r 若存在两个值, 则取低值;

r_{50} 为弯沉盆曲线长度因子, 其值为获得最大弯沉的一半时径向距离;

L_0 为弯沉盆曲线的特征长度;

h 为路床厚度;

I 为影响因子;

α 、 β 、 B 为弯沉盆曲线影响因子, 取值见表1;

y_0 、 m 为弯沉盆曲线长度特征系数, 取值见表1;

\bar{m} 为结构刚度比系数, 取值见表1;

注: Hogg法中, Δ 与 D 符号意义相同, r_{50} 与 r_5 符号意义相同。

表1 Hogg模型参数

方程	类型		I	II	III	
		刚性层深度	h/L_0	10	10	无限大
		泊松系数	μ_0	0.50	0.40	全部
1		影响因子	I	0.1614	0.1689	0.1925
2	Δ_r/Δ_0			>0.70	>0.426	全部
	$r_{50}=f(\Delta_r/\Delta_0)$	α		0.592	0.548	0.584
		β		2.460	2.629	3.115
		B		0	0	0
	Δ_r/Δ_0			<0.70	<0.426	-
	$r_{50}=f(\Delta_r/\Delta_0)$	α		0.219	0.2004	
β			371.1	2283.4		
B			2	3		
3	$l=f(r_{50}, \alpha)$	y_0		0.620	0.602	0.525
		m		0.183	0.192	0.180
4	$S_0/S = f(\alpha/l)$	\bar{m}		0.52	0.48	0.44

与此同时, Wiseman提供了3种实现Hogg模型的方式。一种是针对无限弹性基础, 另外两种情况用于弹性有限层, 其有效厚度假设大约等于特征长度 L_0 的10倍。有限厚度下又分为两种情况, 分别对应于泊松系数为0.4和0.5的情况^[5]。表1展示了Hogg模型的三种类型对应的常数值。

考虑到Hogg模型的情况II已经在秘鲁得到了广泛的应用, 并且, 通过自1987年以来的长期路面性能观测, 该情况均提供了相当稳定的结果, 因此在分析弯沉数据时选择第二种情况。美国在过去15年间进行了长程路面性能研究项目, 同样认为情况II较能符合现场实际情况。

(二) Hogg简化模型的基本原理

根据弯沉检测数据绘制弯沉盆曲线, 确定最大弯沉 D_0 和径向距离 R 处的弯沉 D_r , 计算 D_0/D_r 。按照Hogg模型的情况II, 使用公式2计算曲线长度因子 R_5 , 进而得到 $D_0 \times R_5$ 。随后, 利用MODCOMP4程序对Hogg模型的2135个数据组($D_0 \times R_5, E_0$)进行回归分析, 其中 $D_0 \times R_5$ 的变化区间为324-6778 ($10^{-1} \text{cm} \cdot \text{cm}$), E_0 的变化区间为260-5236 (kg/cm^2), 通过回归分析, 发现指数趋势显示出更好的拟合, 即得公式5所示的简化Hogg模型, 相关系数 R^2 为0.992, 图1展示了拟合曲线。

$$E_0 = 1091314.96 \times (D_0 \times R_5)^{-0.939} \quad (5)$$

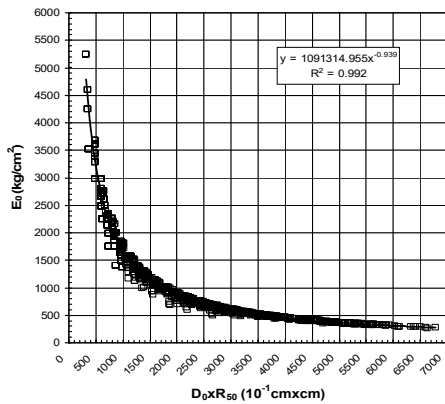


图1 $D_0 \times R_{50}$ 与 E_0 的相关曲线拟合结果

为了验证简化Hogg法的准确性, 对于相同的弯沉检测数据, 分别采用Hogg法和简化Hogg法, 计算路基回弹模量, 结果如图2所示, 可以看出, 这些值均位于直线上, 表明两种方法获得的结果在统计学上可认为是相似的。需要注意的是, 简化法的提出仅针对现场快速控制, 应针对每个特定项目进行必要的验证。

根据已知的加州承载比(CBR)和路基弹性模量的关系式, 由Hogg模型计算得到的路基回弹模量, 计算路基材料CBR的现场检测值。

Heukelom和Klomp以CBR为12%作为临界值, 分两种情况考虑, 建立了公式6和公式7, 普遍认为, 上述公式能较为真实地反映不同路基的路基回弹模量与CBR值的关系^[7]。

$$Mr = 22,1 \times CBR^{0.55} \quad (12\% < CBR < 80\%), \quad [\text{MPa}] \quad (6)$$

$$Mr = 17,6 \times CBR^{0.64} \quad (CBR < 12\%), \quad [\text{MPa}] \quad (7)$$

其中:

E_0 为路基回弹模量 (kg/cm^2); CBR为加州承载比(%) ;

二、Hogg法推算路基承载能力的应用

本章基于ESPINO公路项目填方成型路段, 分别应用前文所述Hogg模型及其简化模型分析弯沉试验检测的数据, 推算出路基弹性模量和CBR值。本文选取

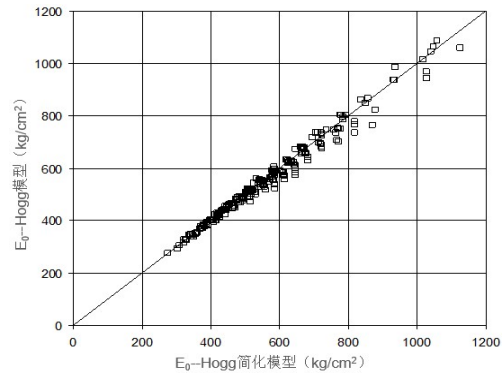


图2 简化Hogg模型的验证

表2 弯沉试验结果

序号	里程	载重车行驶到不同位置处时百分表读数 (1/100mm)								
		0cm	20cm	30cm	40cm	50cm	60cm	90cm	150cm	500cm
1	112+100	0	2	3	4	5	6	7	8	10
2	112+120	0	2	3	4	5	6	9	11	12
3	112+140	0	2	3	5	6	7	8	9	10
4	112+160	0	2	3	4	5	7	8	9	11
5	112+180	0	2	3	5	6	7	8	9	10
6	112+200	0	2	3	4	5	6	8	9	10
7	112+220	0	2	3	5	7	8	10	13	15
8	112+240	0	3	4	6	8	9	10	12	15
9	112+260	0	2	5	8	10	14	15	16	19
10	112+280	0	3	4	5	7	8	10	11	14

K112+100-K112+300作为试验段。

(一) 弯沉检测

(1) 试验仪器

弯沉试验采用振动式贝克曼梁，梁臂比为1:2，型号为TCP-1023。百分表表盘的最小刻度是0.01mm，该设备配备由电池供电的内部振动系统，将在试验期间运行，可以避免百分表表盘读数不动以及避免外部干扰影响读数。

加载设备采用后轴为单轴双轮的卡车，卡车装载实心混凝土试块，其不能移动而改变轴载，其后轮轴重为8.2吨（标准轴载，荷载系数为1），荷载分布到双轮，双轮气压为80psi。卡车的轮胎尺寸是10.00-20.00。

(2) 试验步骤

弯沉检测试验在路床顶面进行。检测前，确保工作面处于干燥状态以及轮胎轴载和轮胎胎压满足要求。试验位于K112+100-280段右侧行车道，测点距右侧路肩内边缘1m，贝克曼梁的测端置于载重车后轴的轮隙之间。弯沉试验将以20m的等间距进行，当载重车行驶到在距离初始加载点0、20、30、40、50、60、90、150和

500cm的位置处时，读取百分表读数，共需记录9个读数。

(3) 试验结果

弯沉试验结果如表2所示。

(二) Hogg法推算路基回弹模量

现场利用Hogg简化模型对表2中弯沉检测数据进行分析，得到弯沉盆参数，并初步计算路基回弹模量和材料CBR现场检测值，计算结果见表3。

将Hogg模型输入到EXCEL表中，对表3中弯沉检测数据进行分析，精确计算路基回弹模型及材料CBR现场检测值。

根据表3和回弹模型及材料CBR现场检测值，将Hogg模型及其简化模型得到的数据处理结果进行对比，得到表4。

由表4可知，两种模型下计算出的曲线长度因子 R_5 相同，路基回弹模量 E_0 和CBR相近，说明利用Hogg简化模型现场快速推算路基承载能力具有可靠性，同时发现，Hogg简化模型得到的结果偏低，其路基回弹模量 E_0 和CBR分别是Hogg模型的91%和83%。

表3 现场弯沉检测数据分析结果（采用简化Hogg模型）

里程	R	D_0	D_R	D_0/D_R	R_5	路基回弹模量 E_0 (kg/cm ²)	路基回弹模量 E_0 (PSI)	CBR
112+100	50.0	20.0	10.0	2.0	50.0	1663	23656	38
112+120	60.0	24.0	12.0	2.0	60.0	1181	16797	21
112+140	40.0	20.0	10.0	2.0	40.0	2051	29170	56
112+160	50.0	21.6	12.0	1.8	55.3	1385	19694	28
112+180	40.0	20.0	10.0	2.0	40.0	2051	29170	56
112+200	50.0	20.0	10.0	2.0	50.0	1663	23656	38
112+220	50.0	25.6	16.0	1.9	53.8	1061	15092	17
112+240	50.0	29.4	14.0	2.1	46.5	1217	17315	22
112+260	50.0	37.8	18.0	2.1	47.2	961	13669	14
112+280	50.0	28.0	14.0	2.0	50.0	1213	17248	22

表4 HOGG模型及其简化模型数据处理结果对比

参数	模型		简化模型占比
	Hogg模型	Hogg简化模型	
R_5 平均值	49.3	49.3	100%
路基回弹模量 E_0 平均值(PSI)	22424	20547	91%
CBR平均值	37	31	83%

三、结论

本文在对Hogg法基本原理进行阐述的基础上，结合玻利维亚Espino项目，现场采用Hogg简化模型分析弯沉试验数据，快速计算路基承载能力，并利用Hogg基本模型对其简化模型进行验证，证明Hogg简化模型具有可靠性，现场可以快速进行质量检测，且更加严格，有利于加强施工质量控制。

因此，运用Hogg法分析弯沉试验结果，可以快速准确地推算路基承载能力，同时通过自带检验程序，确保数据的准确性。

参考文献

[1]王旭东,郭大进,邓学钧.动态弯沉盆几何特性分

析[J].东南大学学报,1999,29(5):115-120.

[2]查旭东.基于同伦方法的路面模量反算的研究[D],西安:长安大学,2001.

[3]李强.路基路面检测技术[D],西安:长安大学,2002.

[4]Hogg, A.H.A. Equilibrium of a thin slab on an elastic foundation of finite depth. Philosophical Magazine, Vol. 35 (243), 1944.

[5]Stubstad, R.N. et al. Review of the Long-Term Pavement Performance backcalculation results. Final Report. Report N° FHWA-HRT-05-150. Federal Highway Administration, Virginia, 2006.