

基于剪力—柔性梁格法的曲线连续刚构桥分析

尹富秋¹, 褚文涛²

(1 中交第二航务有限公司四分公司, 安徽 芜湖 241005; 2 中铁大桥局集团武汉桥梁科学研究院, 湖北 武汉 430000)

摘 要: 基于剪力—柔性梁格理论结合实际工程对大跨 S 形曲线连续刚构进行了施工节段仿真分析, 对纵、横向梁格间距的进行了合理划分以及对梁格刚度进行了准确模拟。通过与单梁有限元模型计算结果的对比, 深入的研究了曲线连续刚构的变形特点以及其空间位移特性。

关键词: 曲线连续刚构桥; 弯扭耦合; 梁格法; 径向位移

中图分类号: U448.23

文献标识码: A

文章编号: 1006-7973 (2009) 07-0201-03

引言

由于复杂地形的限制以及高等级公路线形的需要, 曲线连续刚构桥被越来越多的应用。与直线连续刚构相比, 其具有“弯扭耦合”的特点, 受力形式较为复杂。对于 $L^2/bR > 1$ (L 为桥梁轴线弧长, b 为桥梁半宽, R 为曲线半径) 则不能忽略因为扭矩而产生的耦合弯矩的影响, 应该采用曲线桥的理论考虑^[1]。

将梁格法与有限元法相结合已经被越来越多地应用到曲线桥的结构分析中。其分析对象大多是小跨度等截面的曲线梁桥, 但是却很少应用于大跨度、变截面的曲线连续刚构桥。本文基于剪力—柔性梁格理论结合实际工程项目, 使用桥梁专业分析软件 MIDAS/Civil 模拟了曲线连续刚构的悬臂浇筑施工过程, 并对其受力特点进行了分析比较, 对同类桥的设计施工提供了有效的参考。

一、相关计算理论

1. 圆弧曲线梁的平衡方程

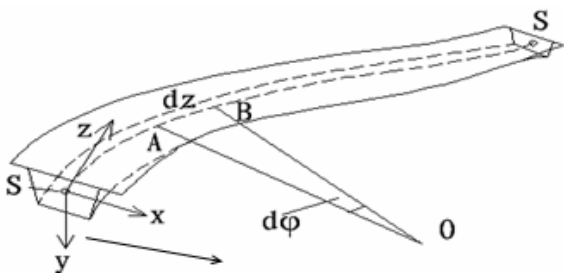


图 1 曲线梁分析中的三维直角流动坐标系
在荷载作用下, 著名的伏拉索夫位移方程如下:

$$\frac{EI_w}{R} \eta^{IV} - \frac{EI_x + GI_t}{R} \eta'' + EI_w \phi^{IV} - GI_t \phi'' + \frac{EI_x}{R^2} \phi = m_z \quad (1)$$

$$\left(\frac{EI_w}{R^2} + EI_x \right) \eta^{IV} - \frac{GI_t}{R^2} \eta'' + \frac{EI_w}{R} \phi^{IV} - \frac{EI_x + GI_t}{R} \phi'' = q_y + m'_x \quad (2)$$

$$EI_y \left(\xi^{IV} + \frac{2\xi'''}{R^2} + \frac{\xi'}{R^4} \right) = q'_x - \frac{q_z}{R} - m''_y - \frac{m_y}{R^2} \quad (3)$$

式中 ξ 、 η 分别代表 X、Y 方向的位移, ϕ 代表 Z 矢量方向的转角, 即我们通常所说的扭转角。

I_x 、 I_y ——杆件绕 x 轴和 y 轴的惯性矩

I_w ——杆件横截面的扇形主惯性矩, 又称翘曲惯性矩;

I_t ——杆件横截面的圣维南扭矩, 又称为自由扭转惯性矩。

从以上所列微分方程可以看出, 当外荷载作用下, 梁截面产生弯矩的同时必然产生扭矩; 而产生扭矩的同时必然伴随着耦合弯矩。所以相应的竖向挠曲变形与扭转角之间对应的产生耦合效应^[2]。

2. 剪力柔性梁格理论

梁格法将上部结构模拟为若干个等效梁格, 将分散在原结构中每一区段的弯曲刚度和抗扭刚度集中于最临近的等效梁格内。实际结构的纵向刚度集中于纵向梁格上, 横向刚度集中于横向梁格上。理想的刚度等效原则应该满足: 当原型实际结构和对应的等效梁格承受相同荷载时, 两者的挠曲将是恒等的, 并且每一梁格内的弯矩、剪力和扭矩等于该梁格所代表的实际结构部分的内力^[3]。剪力—柔性梁格法的分析原理是充分考虑弯桥的受力特性使梁格节点与实际结构重合的点承受相同挠度和转角, 由此梁格产生的内力局部静力等效于结构的内力, 其实质是将传统的一维杆单元计算模式推进到二维计算模型, 用一个二维的空间网格来模拟结构的受力特性^[4-5]。

二、梁格有限元模型建立

本文所分析的曲线连续刚构桥的桥跨布置为: $85+150+85=320\text{m}$, 桥面中心设计标高为 718.243m。大桥竖曲线为一纵坡为 2.9% 的直线, 全桥均位于平曲线上, 其中小里程侧平曲线半 $R=505.308\text{m}$, 大里程侧平曲线半径 $R=624.217\text{m}$, 其间以缓和曲线过渡。采用 MIDAS/Civil 软件对该桥进行梁格法有限元建模, 全桥共划分为 254 个纵向梁格单元、242 个横向梁格单元。纵向梁格节点沿着曲线连续刚构箱形截面两侧腹板中心线建立, 横向梁格单元分为实际横梁和虚拟横梁两种。其中, 在零号块墩顶、1/4 跨截面处以及边支座处依据实际横梁刚度建立横向梁格单元。其余选臂浇筑节段均依照梁格理论建立虚拟横向梁格单元。虚拟横向梁格采用工字型截面模拟, 顶、底板的厚度与该处箱

收稿日期: 2009-05-26

作者简介: 尹富秋, 中交第二航务有限公司四分公司工程师。

梁截面的顶、底板厚度相同,其宽度取纵向梁格间距的一半。

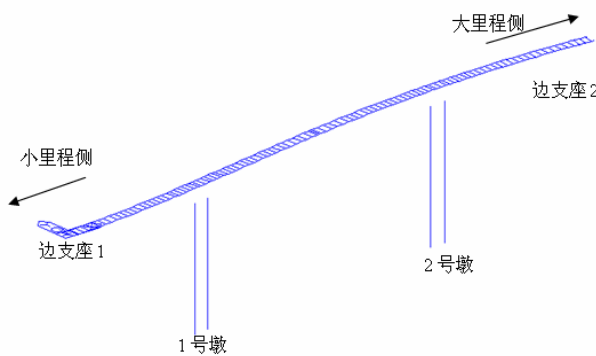


图 2 曲线连续刚构桥梁格划分立体图

三、计算结果及其分析

为了校核梁格模型分析结果的准确程度,比较单梁模型与梁格有限元模型自重荷载作用下的反力与内力结果。

表 1 自重作用下支座反力结果表格

桥墩	方向	FX (kN)		FZ (kN)		MX (kN*m)		MY (kN*m)	
		单梁	梁格	单梁	梁格	单梁	梁格	单梁	梁格
1号墩	小里程侧	-100	-101	34240	34305	10268	9372	-958	-1082
	大里程侧	101	101	35138	35989	10024	8941	3042	2913
2号墩	小里程侧	-93	-90	36002	35978	-25869	-26441	-1872	-2018
	大里程侧	88	90	35781	36713	-25874	-26532	1956	1824
合力		-4	0	141160	142986	-31450	-34660	2168	1637

表 2 成桥后自重作用下内力结果表格

位置	单元	剪力-z (kN)		扭矩 (kN*m)		弯矩-y (kN*m)		剪力 误差 (%)	扭矩 误差 (%)	弯矩 误差 (%)
		单梁	梁格	单梁	梁格	单梁	梁格			
1/4跨处	21	7351	7254	1476	1610	-106524	-106301	1.3	-9.1	0.2
	22	8121	8019	2010	2130	-129574	-129056	1.3	-6.0	0.4
	23	8922	9015	2633	2744	-154988	-154475	-1.0	-4.3	0.3
	24	9791	9836	3325	3415	-182770	-182463	-0.5	-2.7	0.2
	34	19624	19305	12981	12151	-573068	-572688	1.6	6.4	0.1
	35	20488	20228	13760	12014	-608081	-607034	1.3	12.7	0.2
	36	-1399	-1479	4176	3591	-616014	-614866	-5.7	14.0	0.2
	37	-382	-354	5070	4480	-614234	-613512	7.3	11.6	0.1
墩顶处	38	1145	1110	6226	5628	-615364	-615454	3.1	9.6	0.0
	39	2165	2287	6968	6365	-618660	-619498	-5.7	8.7	-0.1
	40	-20609	-20966	-1983	-1984	-616272	-617397	-1.7	0.0	-0.2
	41	-19668	-19666	-1440	-1441	-581082	-582078	0.0	-0.1	-0.2
	42	-18531	-18540	-849	-852	-533359	-534349	0.0	-0.4	-0.2
	63	-589	-594	13	22	5292	5696	-0.7	-71.5	-7.6
	64	-110	-111	28	28	6084	6493	-1.0	0	-6.7
	65	104	104	35	48	6087	6497	-0.2	-36.2	-6.7
	66	584	588	50	62	5306	5712	-0.6	-24.3	-7.7

由表 1 分析可得,自重作用下梁格模型和单梁模型竖向反力合力结果仅相差 1%,梁格法计算结果偏大。产生误差的原因是:梁格模型考虑了曲线内外弧侧梁段的自重差;梁格模型横隔板建模时没有将过人洞部分重量扣除。梁格模型

与单梁模型支座反力的分配偏差并不大,这说明了梁格模型结构刚度的分配基本符合原结构的实际状况。由表 2 分析可知,自重作用下梁格模型的弯矩以及剪力计算结果与单梁法误差很小,一般均在 5%以下。这表明了原箱梁截面切分为梁格截面后,其纵向抗弯刚度模拟准确。扭矩值计算结果偏差相对较大,但是其变化趋势与单梁基本一致。这证明通过梁格理论去修正梁格的截面特性能够保证计算结果的等效性。

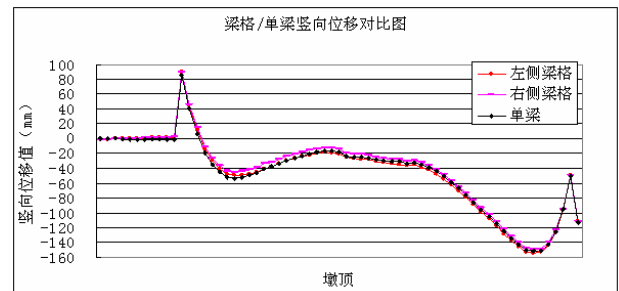


图 3 1号墩CS合计作用下梁格/单梁竖向位移对比图

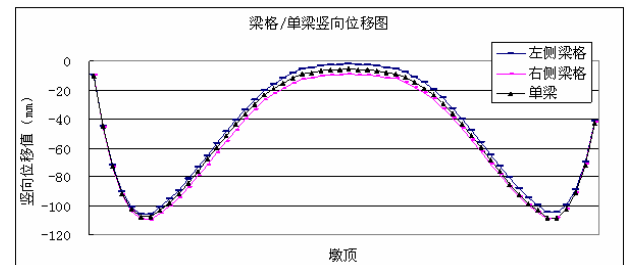


图 4 2号墩自重作用下梁格/单梁竖向位移对比图

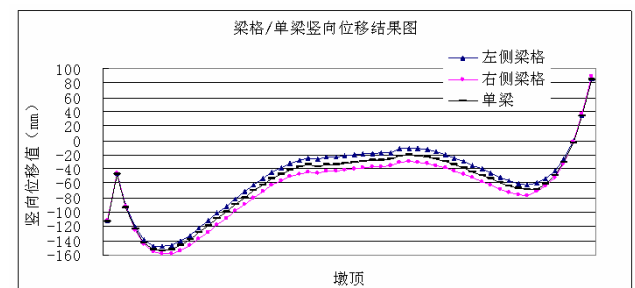


图 5 2号墩CS合计作用下梁格/单梁竖向位移对比图

从图 3 可知,1号墩左、右梁格以及单梁的三条位移曲线几乎重合在一起,从数值上来看,单梁的竖向位移结果位于左右侧梁格位移结果之间,左右侧梁格竖向位移差值最大值仅为 7mm,且左侧梁格的竖向位移值均比右侧梁格大。

从图 4,5 可知,2号墩左右侧梁格竖向位移差值较 1号墩要更加明显些,左右侧梁格竖向位移差值最大值达到了 19mm,且右侧梁格的竖向位移值均比左侧大。前文已介绍,后河大桥的左右侧以从宜昌至恩施方向为基准。因此从计算结果分析可得:大跨曲线连续刚构的竖向位移值表现为内侧大于外侧。

四、本文主要结论

本章首先介绍了梁格法的计算理论以及 (下转 204 页)

由式 (6) 得:

$$EI = 4ml^2 \frac{n_2^2 f_{n_1}^2 - n_1^2 f_{n_2}^2}{n_1^2 n_2^2 (n_1^2 - n_2^2)} \quad (7)$$

将式 (7) 代入式 (6) 可得:

$$T = 4ml^2 \frac{n_1^4 f_{n_2}^2 - n_2^4 f_{n_1}^2}{n_1^2 n_2^2 (n_1^2 - n_2^2)} \quad n_1, n_2 = 1, 2, 3, \dots \quad (8)$$

已知第一阶、已知二阶频率, 则 $EI = \frac{f_2^2 - 4f_1^2}{3} ml^2$,

$$T = \frac{16f_1^2 - f_2^2}{3} ml^2;$$

已知第一阶、已知第三阶频率, 则 $EI = \frac{f_3^2 - 9f_1^2}{18} ml^2$,

$$T = \frac{81f_1^2 - f_3^2}{18} ml^2;$$

依次类推, 利用式 (7)、(8) 可以方便的识别出抗弯刚度 EI , 求解索力 T 。

使用公式 (7)、(8) 时, 应尽量采用低阶频率进行计算。因为高阶振型需要按弹性理论来考虑截面内的剪切变形, 而式 (6) 是建立在不考虑剪切变形梁的微幅自由振动基础上的, 若采用高阶频率进行计算可能导致较大的误差。

四、垂度的影响

关于斜拉桥垂度的影响, 文献^[2]进行了研究。引入了无量纲参数 λ^2 , 给出了考虑拉索垂度影响的索力计算公式:

$$\lambda^2 = \left(\frac{mgl}{H} \right)^2 \frac{EAl}{l_e} \quad (9)$$

式中:

$$l_e = l \left(1 + \frac{1}{8} \left(\frac{mgl}{H} \right)^2 \right), \quad H \approx T \quad (10)$$

其中: H 为索力水平方向分量, 近似等于 T ; A 为索的横截面积

$$T = 4ml^2 f^2 \quad (\lambda^2 \leq 0.17) \quad (11)$$

$$T = \sqrt{ml^2 (4f^2 T^2 - 7.569mEA)} \quad (0.17 \leq \lambda^2 \leq 4\pi^2) \quad (12)$$

$$T = ml^2 f^2 \quad (4\pi^2 \leq \lambda^2) \quad (13)$$

目前世界上超过 95% 的斜拉索的特征参数 λ^2 的范围为 $\lambda^2 < 3.1$, 此时, 索的垂度对基频的影响最大可达 10.17%, 考虑垂度的影响, 索力可按照式 (11) (12) (13) 计算。

五、斜度的影响

实际的拉索结构中, 大部分拉索存在斜度。文献^[5]分析表明, 在其它条件不变的情况下, 当拉索的斜角由 10° 增加到 70° 时, 相同频率下索力的变化不超过 0.007%, 因此在拉索的索力测试过程中, 斜度对测试结果的影响可以忽略不计。

六、边界条件的影响

实际拉索边界条件的确定受较多因素的影响, 具体操作起来较为复杂。一般认为拉索的实际边界条件是介于固结和铰结之间的, 影响边界条件选取的因素主要有索力和索长, 一般认为短索偏于固结, 长索偏于铰结; 索力较大时偏于固结, 索力较小时偏于铰接。文献^[1]分析表明, 铰结边界与固结边界的结果相差较小, 本文在此不做深入分析。

七、结语

本文分析了频率法测试斜拉索索力各参数对索力计算精度的影响, 给出了抗弯刚度影响的修正方法, 和考虑垂度影响的计算公式, 对从事索力监测的专业技术人员测试斜拉索索力提供了一些有益的参考。

参考文献

- [1] 方志, 张智勇. 斜拉桥索力的测试. 中国公路学报, 1997 (3).
- [2] 任伟新, 陈刚. 由基频计算拉索拉力的实用公式. 土木工程学报, 2005 (38): 26-31.
- [3] 吴康雄, 刘克明, 杨金喜. 基于频率法的索力测量系统. 中国公路学报, 2006, 19 (2): 62-66.
- [4] 姚文斌, 程赫明. 钢丝绳抗弯刚度的测定. 力学与实践, 1998 (2): 43-45.
- [5] 魏建东. 斜拉索各参数取值对索力测定结果的影响, 力学与实践, 2004 (26): 42-44.
- [6] 李庭波. 索力测试频率法的研究及其工程应用[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2007: 24-32.

(上接 202 页) 应用形式, 尤其需要注意网格的划分以及纵、横向梁格刚度的修正。然后基于剪力—柔性梁格理论结合后河大桥的施工过程模拟尝试了对变截面曲线连续刚构桥进行梁格仿真分析。分析比较梁格法与单梁计算结果后得到结论如下:

1. 通过与单梁法内力、反力计算结果对比可知: 本文梁格法有限元模型网格划分合理、有效的模拟了纵、横向梁格的各项刚度且各项荷载施加准确。

2. 本文的梁格有限元模型进行了准确的施工阶段分析, 逐段施加的梁段自重以及预应力荷载作用下的内力结果与单梁有限元模型计算结果基本相同。

3. 累计荷载作用下, 左、右侧纵向梁格的竖向位移值不

相等。且弯曲程度越大, 该差值越大。

4. 弯扭耦合引起大跨曲线连续刚构的竖向位移值与一般曲线梁结果不同, 表现为内弧侧竖向挠度大于外弧侧。

参考文献

- [1] 邵容光. 混凝土弯梁桥. 北京: 人民交通出版社, 1991.
- [2] 褚文涛. 曲线连续刚构桥径向位移分析[J]. 华中科技大学学报 (城市科学版) 2008 年第 25 卷第 2 期.
- [3] Hambly. Bridge Deck Behaviour, London. 1976.
- [4] 马勇毅. 剪力—柔性梁格法在 MIDAS 中的具体应用[J]. 中外公路, 007, 第 27 卷第 5 期.
- [5] 张丽. 多格室斜弯箱梁空间分析的梁格法研究: [硕士学位论文]. 福州: 福州大学, 2007.