

# 薄壁高墩连续刚构桥的空间稳定分析

何 畅

(中交公路规划设计院 北京市 100010)

**摘 要:** 薄壁高墩连续刚构桥由于自身的力学特点,其稳定问题日显突出。本文以南河大桥的工程实际,在欧拉弹性理论的基础上,利用空间有限元法对其进行稳定分析。通过分析比较,提出了对此类桥型稳定分析的方法和建议。

**关键词:** 薄壁高墩; 连续刚构; 有限元; 稳定

随着交通事业的大力发展,特别是近年来,高速公路建设正以前所未有的速度不断地向山区延伸,由于山区特有的山高、沟深、坡陡的地形条件,致使高桥墩的修建日益增多。而预应力混凝土连续刚构桥以其跨越能力大、整体性能强、受力合理、施工方便等优点,越来越受到桥梁工程师的青睐。

为了能有效地减小上部结构的内力,减小温度、混凝土收缩徐变以及地震的影响,要求顺桥向墩的抗推刚度小,加之高强度材料和先进施工方法的不断出现,预应力混凝土连续刚构桥开始向薄壁、高墩和大跨径趋势发展,这就使其稳定问题日显突出,甚至有时对整个结构的受力起控制作用。为了确保薄壁高墩连续刚构桥的安全使用,空间稳定分析是合理设计的关键。

笔者结合南河大桥的稳定分析,对薄壁高墩连续刚构桥的稳定性的理论方法、内容及结果进行了探讨。

## 1 分析理论

薄壁高墩连续刚构桥是典型的压弯构件,稳定性问题属于极值点失稳。但由于极值点失稳中的非线性(几何、材料)判别依据还存在不同的争论,另外经特征值法得到的平衡分支荷载通常代表实际体系极限稳定荷载的可靠上限,所以工程实际中,一般仍将平衡分支失稳分析作为评估结构的实际承载力的重要工具,其分析理论如下:

$$([K_D] + [K_G])\{\delta\} = \{F\} \tag{1}$$

式中:  $[K_D]$  为单元几何刚度矩阵;  $[K_G]$  为初始应力刚度矩阵;  $\{\delta\}$  为节点位移;  $\{F\}$  为杆件所受的内力。

当  $\{F\}$  增加  $\lambda$  倍,则杆力和几何刚度矩阵也增大  $\lambda$  倍,因此有:

$$([K_D] + \lambda[K_G])\{\delta\} = \lambda\{F\} \tag{2}$$

如  $\lambda$  足够大,使得结构达到随遇平衡状态,即当  $\{\delta\}$  变为  $\{\delta\} + \{\Delta\delta\}$ ,则式(2)变为:

$$([K_D] + \lambda[K_G])\{\delta + \{\Delta\delta\}\} = \lambda\{F\} \tag{3}$$

要同时满足式(2)和式(3)的条件是:

$$([K_D] + \lambda[K_G])\{\delta\} = 0 \tag{4}$$

$\lambda_{\min}$  为最小稳定特征值,  $\lambda_{\min}\{F\}$  为临界荷载值。

## 2 南河大桥概况

南河大桥是太原~澳门国道主干线晋济高速公路上跨越南河底谷地的大型桥梁,桥梁全长 852.00m。全桥跨径布置为: 40 m + 120 m + 3 × 180 m + 100 m 的 6 跨一联的预应力混凝土连续刚构—连续梁的结构形式,如图 1 所示。

主桥上部结构采用斜腹板的预应力混凝土箱梁,箱梁为单箱单室断面,采用纵向、横向和竖向预应力混凝土结构。箱梁顶面横坡与路线横坡一致,为双向 2 % 横坡,箱梁底面水平。

箱梁顶宽为 24.5 m,底宽为 8.656~11.408 m,悬臂长 6.0 m。合拢段处箱梁中心高度为 4.50 m,底板厚 0.32 m; 0 号块箱梁中心高为 12.50 m,底板厚 1.40 m; 从悬臂端到 0 号块根部箱梁高度

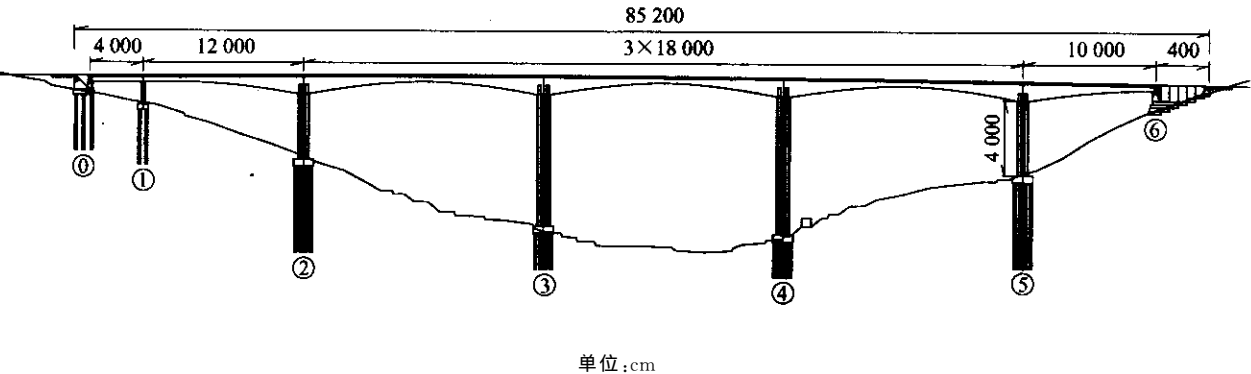


图 1 南河特大桥的总体布置

按 $H=4.50+\frac{8.0}{83.5^{1.75}}\cdot x^{1.75}$ 变化;底板厚按 $h=0.32+\frac{1.08}{83.5^{1.75}}\cdot x^{1.75}$ 变化( $x$ 为计算截面至悬臂端的距离)。

主桥 1 号墩采用钢筋混凝土矩形实体桥墩,截面尺寸为 2.5 m×11.6 m,基础承台厚度为 3.0 m,采用 6 根桩径为 2.0 的桩基础。桩基础按嵌岩桩设计,嵌岩深度不小于 6 m,单桩最大竖向力为 13 000 kN。2 号、5 号墩采用钢筋混凝土双壁椭圆实心墩,单片墩外形平面尺寸为 (2.0~3.0)m×11.0 m,双壁墩外边缘距离为 8 m。3 号、4 号墩采用钢筋混凝土双薄壁椭圆形空心墩,单墩外形平面尺寸为 (2.0~4.0)m×11.0m,双壁墩外边沿距离为 10 m;薄壁厚度纵向为 0.6 m,横向 0.8 m。且 3 号、4 号墩墩高分别为 81 m 和 85 m,为全桥最高、最薄的 2 个墩。

3 稳定分析过程

南河大桥的稳定分析是以欧拉弹性理论为基础,利用有限元法对其进行的空间稳定分析,采用国际通用的结构分析程序 ANSYS 进行。计算模型用 beam189 单元(三维二次有限应变梁单元)来模拟。该单元非常适合分析线性、大角度转动和非线性大

应变问题。

3.1 薄壁空心高墩的自体稳定性

该桥 4 号墩(墩高 85 m)为全桥的最高墩,且墩身采用的是不加任何横梁的钢筋混凝土双薄壁椭圆形空心墩,是稳定分析的最不利墩。在稳定分析时,采用底端固结、顶端自由的空间三维梁单元模型,经单元划分将结构离散为 50 个梁单元、51 个节点,结构自重计入单元内,其他荷载以节点力和均布力的方式施加在结构的相应位置。

3.1.1 风荷载计算

基本风压:山西晋城地区 100 年一遇基本风压为 500 Pa。

(1)横向风压。

根据《公路桥涵设计通用规范》(JTJ021-89)计算风力,横桥向风压为

$$W=K_1K_2K_3K_4W_0 \tag{5}$$

式中: $K_1=1.0$ ;  $K_2=1.1$ ;  $K_3=1.0\sim1.5$ ;  $K_4=0.85$ ;  $W_0=500\text{ Pa}$ ;

(2)纵向风压:取横向风压的 0.7 倍。

3.1.2 稳定分析结果

不同工况下的稳定特征值及墩底截面内力值见表 1。

表 1 薄壁空心高墩稳定分析结果

工作状态	墩高/m	墩底轴力 kN	纵向弯矩 kN·m	稳定特征值 λ	理论计算值(墩底) $N_{cr}$ /kN	失稳模式
自重	85.0	32 446	0	40.204	1 304 458.984	纵向侧倾
自重+纵向风载	85.0	32 446	961.49	40.204	1 304 458.984	纵向侧倾

4 号墩在各工况下的稳定特征值均大于 5,说明墩身在施工阶段的稳定性满足规范要求。由于主桥其他桥墩的高度和承受的荷载均小于 4 号墩,因此

主桥在墩身施工阶段的稳定性满足要求。另外,纵向风载对薄壁高墩的稳定性影响很小。

3.2 最大悬臂状态时结构的稳定分析

此阶段主要以该桥的 4 号墩及 0~18 号块所形成的 T 构为研究对象。主梁为斜腹板式的变截面预应力混凝土箱梁,最大悬臂长为 83.5 m,梁高由墩顶的 12.5 m 按 1.75 次抛物线变化到合拢段的 4.5 m,单元和节点划分严格按照施工梁段长度及断面变化情况进行,结构离散为 144 个梁单元、157 个节点,并且将墩底部与地基固结,墩顶部与 0 号块之间添加刚臂单元连接,结构自重计入单元内,其他荷载以分布荷载或节点荷载的方式施加。

3.2.1 稳定分析结果

最大悬臂状态时,薄壁高墩的稳定分析按以下 3 种工况进行。

- 工况 1:自重+挂篮+施工荷载;
- 工况 2:自重+挂篮+施工荷载+不平衡梁段重+施工误差+纵向风载;
- 工况 3:自重+挂篮+施工荷载+不平衡梁段重+施工误差+横向风载。

施工荷载按主梁上 1 kN/m<sup>2</sup> 的方式施加均布力;不平衡梁段重按一个梁段的 30 % 计算;施工误差按单侧悬臂恒载增加 5 % 计算;风载计算同上。以上不利因素应进行叠加,不得抵消。

不同工况下的稳定特征值及墩底截面内力值见表 2,最大悬臂状态时结构的失稳模态见图 2。

表 2 最大悬臂状态时结构的稳定分析结果

工作状态	墩高/m	墩顶轴力/kN	墩底纵向弯矩/(kN·m)	墩底横向弯矩/(kN·m)	稳定特征值 λ	理论计算值(墩顶)N <sub>cr</sub> /kN
工况 1	左肢 85	65 673	9.345 7×10 <sup>3</sup>	0.001 621 9	14.488	10 597 880
	右肢 85	65 673	9.345 7×10 <sup>3</sup>	0.001 621 9		10 597 880
工况 2	左肢 85	128 390	1.103 0×10 <sup>4</sup>	3.643	14.247	10 590 750
	右肢 85	71 514	3.045 3×10 <sup>4</sup>	3.643		10 592 319
工况 3	左肢 85	128 300	1.034 1×10 <sup>4</sup>	1.377 1×10 <sup>3</sup>	14.247	10 590 750
	右肢 85	71 605	2.976 3×10 <sup>4</sup>	1.369 9×10 <sup>3</sup>		10 592 319

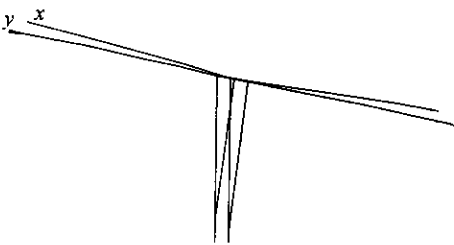


图 2 最大悬臂状态时结构的失稳模态

3.2.2 计算结果分析

- (1)由表 2 可见,薄壁高墩连续刚构在最大悬臂状态时,各工况下的稳定特征值均大于 5,满足规范的要求,说明最不利桥墩(4 号墩)在最大悬臂时具有足够的稳定安全储备。
- (2)由图 2 可知,薄壁高墩连续刚构在最大悬臂状态时,各工况下的失稳模态均为纵向倾覆,说明墩的横向具有足够的刚度。
- (3)最大悬臂状态时,对结构稳定性起控制作用的是恒载、施工荷载、不平衡梁段重等竖向荷载,风荷载相对较小而不起控制作用。

3.3 成桥状态时结构的稳定性

当薄壁高墩连续刚构桥建成后,经体系转化,形成高次超静定结构。此时,结构受载种类增多且动荷

载施加的随意性使每个桥墩受载不等。因此,在成桥状态结构的稳定分析时,将整个主桥作为研究对象,全桥共离散成 593 个单元和 1 780 个节点,采用墩底部与地基固结,在墩顶部与 0 号块之间采用刚臂单元连接,左右桥台处只约束主梁横桥向和竖向的平动自由度,其余  $U_x$ 、 $R_x$ 、 $R_y$ 、 $R_z$  自由度均为释放的刚架模型。

- 该阶段的稳定分析按以下 3 种工况进行。
- 工况 1:自重+二期恒载;
- 工况 2:自重+二期恒载+汽车荷载(纵向偏载)+制动力+纵向风载;
- 工况 3:自重+二期恒载+汽车荷载(满布载)+制动力+纵向风载。

二期恒载:桥面铺装按 17 cm 厚计算,防撞墙及中央分隔带各按 0.8 t/m 计算;汽车荷载按新规范中均布荷载加集中力进行,车道折减、制动力按现行规范计算。

各工况下的稳定特征值及墩底截面内力值见表 3。

各工况下结构的稳定特征值均大于 5,说明成桥后结构的稳定性满足要求。成桥时结构的失稳模态均为纵桥向和横桥向失稳的耦合,见图 3 所示。

表 3 成桥状态时结构的稳定分析结果

工作状态	墩高/m	墩顶轴力/kN	墩底纵向弯矩/(kN·m)	墩底横向弯矩/(kN·m)	稳定特征值λ	理论计算值(墩顶) $N_{cr}$ /kN
工况 1	左肢 85	67 330	$2.353\ 4\times10^3$	$4.102\ 8\times10^3$	30.472	5 199 636
	右肢 85	80 117	$5.388\ 9\times10^3$	$4.168\ 5\times10^3$	30.472	
工况 2	左肢 85	70 865	$2.072\ 9\times10^4$	$4.190\ 2\times10^3$	52.95 3	5 199 220
	右肢 85	77 635	$2.292\ 4\times10^3$	$4.253\ 2\times10^3$	52.593	
工况 3	左肢 85	72 343	$1.888\ 6\times10^4$	$4.337\ 1\times10^3$	50.595	5 196 256
	右肢 85	81 897	$3.027\ 9\times10^2$	$4.407\ 1\times10^3$	50.595	

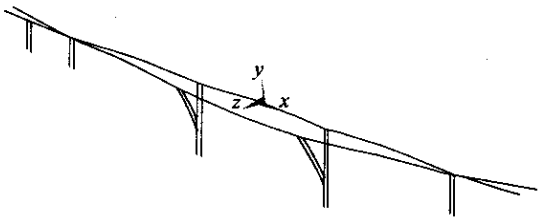


图 3 成桥时结构的失稳模式

4 结论与建议

(1)以薄壁高墩连续刚构桥为研究对象,结合南河大桥的工程实际,在欧拉弹性稳定理论的基础上,利用有限元法对高墩自稳、最大悬臂以及成桥时的各种工况进行了详细的分析研究,分析结果表明各工况下南河大桥的稳定满足规范要求。

(2)对比各施工阶段的稳定特征值系数,不难发现薄壁高墩连续刚构桥在最大悬臂状态时,其稳定特征值系数最小,是薄壁高墩连续刚构桥稳定分析的最不利状态,因此在实际设计中,可只对该阶段进行稳定分析即可。

(3)薄壁高墩连续刚构桥的稳定性与施工阶段有关,对结构稳定性起控制作用的是恒载、施工荷

载、移动荷载等竖向荷载,风荷载相对较小而不起控制作用。

(4)第一类屈曲失稳的临界荷载值为失稳荷载的上限值,加之高墩的墩身,由于施工原因会出现墩身偏斜、弯曲或凹陷等初始缺陷,使得结构的实测失稳临界荷载值可能会大大低于理论分析值,因此在施工时,要严格控制墩身的垂直度,尽量减少高墩的初始缺陷,才能从根本上保证薄壁高墩连续刚构桥的稳定。

参考文献:

[1] 李国豪. 桥梁结构稳定与振动[M]. 北京:中国铁道出版社,1996.

[2] 马保林. 高墩大跨连续刚构桥[M]. 北京:人民交通出版社,2001.

[3] 郭梅. 高墩大跨连续刚构桥稳定分析[J]. 西安公路交通大学学报,1999,19(3).

[4] 王振阳,赵煜. 高墩大跨径桥梁稳定性[J]. 长安大学学报,2003,23(4).

[5] 何畅,向中富. 具有初始缺陷的高桥墩稳定分析[J]. 重庆交通学院学报,2001,36(3).

Space Stability Analysis of Continuous Rigid Frame Bridge with Thin-Walled High Piers

HE Chang

( China Highway Planning and Design Institute(HPDI)Consultants,INC. , Beijing 100010,China )

**Abstract:** Owing to the mechanical feature of continuous rigid frame bridge with thin walled high pier, its stability becomes a very important issue. Taking Nanhe Bridge as a experience example and based on Eluer elastic theory, the space stability is calculated by finite element method. Finally, the method of stability analysis of such type bridges is suggested by analysis and comparison in this paper.

**Key words:** thin-walled high pier; continuous rigid frame; finite element method; stability