

南京龙池立交桥设计中的关键技术问题*

魏洪昌 王于晨 宋运来

(交通部公路科学研究所 北京 100088)

提要 本文论述位于宁连(南京—连云港)一级公路上的南京龙池镇龙池立交桥的一些关键技术问题。编制XLY程序,对各匝道曲线线型及几何参数进行高效快速计算;采用SAP 5程序对弯箱梁的横向分布横隔板作用及独柱偏心影响进行分析,采用QJX综合程序进行预应力配束分析。此外将独柱设计成钢管混凝土柱并采用新型支座——球形支座,使弯桥受力合理,桥梁线型流畅,通行视野开阔。

关键词 预应力弯箱梁 横隔板 钢管混凝土柱 球形支座

Some Key Technical Problems in Design of Longchi Bridge Near Nanjing City

Wei Hongchang Wang Yuchen Song Yunlai

(Research Institute of Highway, Beijing)

Abstract Based on the design of Longchi Overpass Bridge near Nanjing area, some key technical problems concerning the prestressed concrete curved box girder design are highlighted in the paper including the XLY program developed for inputting the parameters automatically and efficiently; the SAP5 adopted for analyzing the diaphragms and transverse distribution factors and the QJX program used for prestressing tendon adjustments. Single-column piers of steel pipe concrete and spherical bearing are designed to suit the visual field requirements of an urban overpass bridge.

Key words Prestressed concrete curved box girder Diaphragm Pipe encased concrete column Spherical bearing

1 工程概况

龙池立交桥位于江苏南京—连云港一级公路六合段的六合县龙池镇。立交桥布置成Y型,分设定向匝道。匝I桥为15 m+25 m+15 m三跨钢筋混凝土连续弯箱梁,中间跨采用独柱式桥墩。匝II桥为14×21 m简支T梁+21 m+2×35 m+21 m连续弯箱梁+6×21 m简支T梁,其中跨越南京—扬州一级公路的连续弯箱梁为单箱双室预应力混凝土,布置见图1。行

* 此工作得到楼庄鸿研究员,陈忠炎、吕建鸣高级工程师的指导,在此表示感谢。

车道宽为 10.75 m，箱梁顶板宽 11.75 m，顶板两侧悬臂各长 2.25 m，弯箱梁沿线路中心线有 8.71 m 长在缓和曲线上，其余长度在半径为 280 m 的圆曲线上，连续弯箱梁两端支承于双柱，中央支承为独柱，使箱梁外观流畅，结构形式合理。

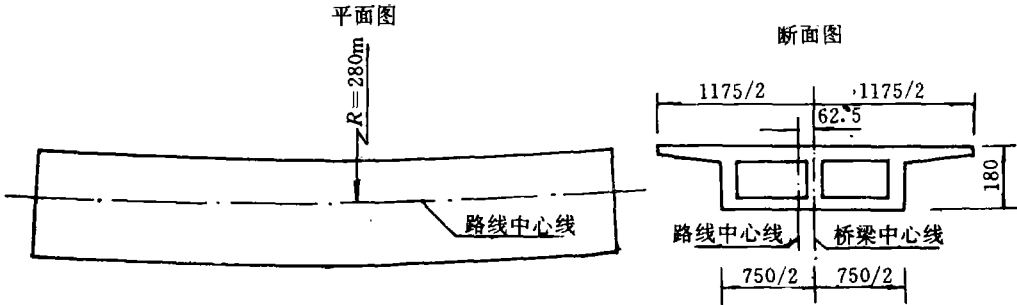


图 1 预应力弯箱梁布置图

设计总体构思是：用自编XLY程序计算匝道的坐标、标高，所得结果可直接用SAP 5程序；用SAP 5程序分析弯箱梁的横向分布和独柱预留偏心，探讨弯桥横隔板的作用；以SAP 5程序得到的横向荷载分布用QJX综合程序分析内力，进行预应力配束。

2 坐标标高计算

SAP 5 程序对输入数据的格式要求十分严格，而弯、坡、斜的异形块计算又相当复杂，如果用手工输入数据，不仅工作量大，而且难免出现错误。为此编制了XLY计算程序，其子程序关系图见图 2。各子程序功能如下：

INPUT子程序为数据输入程序，主要输入路线中心线桩号、曲线半径等参数，确定网格划分参数；

CURE 1、CURE 2、CURE 3、CURE 4 子程序分别用于计算路线中心线上缓和曲线、圆曲线、直线、复合圆曲线等各点坐标；

ROTE 1子程序为CURE 2子程序中圆曲线过了曲线中点后各网格点坐标所需的局部转换；ROTE子程序可以计算以某一点为基准点的相对坐标，也可以计算大地坐标；

GAOCHEN子程序可以计算凹或凸形竖曲线的各点高程及以某一点为基准点的相对高程；

XTU 1子程序用于计算除路线中心线以外各网格点的坐标；

XTU 2子程序用于计算CURE 2子程序中圆曲线过了曲线中点后的各网格点坐标。

XLY程序可以对异形块任意划分网格，可以对局部区域进行网格加密。在最后的计算结果中，所有网格点坐标既可以是大地坐标和高程（用于施工

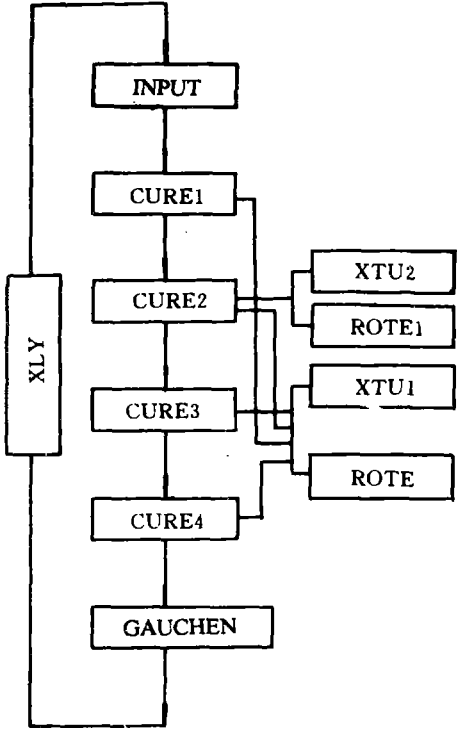


图 2 XLY程序中各子程序关系图

控制),也可以是以某一点为基准点的相对坐标(用于SAP 5 的数据,相对坐标计算中输出的数据格式,即是SAP 5 程序所需的输入格式)。

3 SAP 5 程序计算分析

3.1 SAP 5 计算模型

本文采用四边形板单元来模拟弯箱梁的顶板、底板及腹板。为了分析独柱偏心影响,在箱梁底板对着独柱位置附近范围内采用三角形板单元,所有支座则均采用梁单元。整个预应力弯桥划分了 262 个结点,并按顶板、底板、腹板、梁单元等分成 6 批共 289 个单元。另外在荷载计算中,静载工况考虑了箱梁自重及温升;活载工况考虑了在连续梁最大正弯矩、最大负弯矩及最大支反力影响线上,汽车和挂车在桥面内外侧加载 14 种荷载工况,共 200 多个荷载作用点。由于SAP 5 程序中外加荷载是以结点力的形式出现的,如果手算将 200 多个荷载分配到相应结点上,其工作量之大无法想象。为此采用XLY计算程序、图形检验程序及我所吕建鸣高级工程师编制的NPCT程序相结合,来计算每一种活载工况下的结点力。首先用XLY计算程序计算出每种活载工况下各荷载作用点的空间坐标,然后用图形检验程序直观检查加载位置是否正确。图 3、图 4 即为计算机屏幕上显示的加载图形,其中数字为支座编号,圆点表示轮载位置,圆点愈大,则表示相应的轮载亦较大。在计算机屏幕上;通过开窗口,对局部放大,还可显示轮载位置附近的单元号、结点号,使检查十分方便。所有活载工况检查无误后,最后用NPG程序判断荷载作用的单元,并按加权方式向这个单元的结点分配荷载,计算出每一种活载工况下的结点力,输出的荷载数据格式,也正是SAP 5 计算所需的格式。

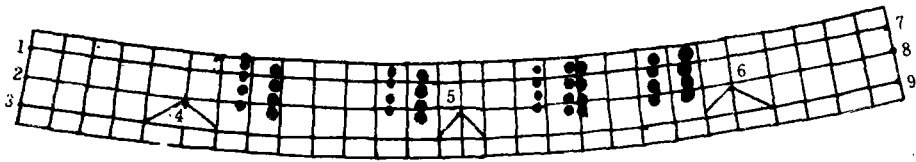


图 3 最大负弯矩时汽车内侧加载显示图

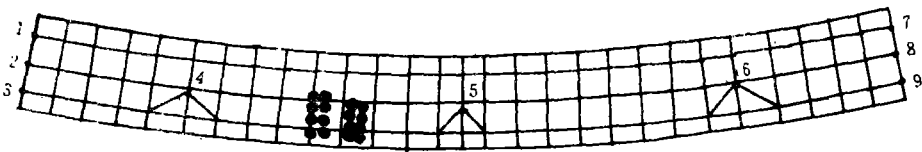


图 4 最大负弯矩时挂车外侧加载显示图

3.2 横隔板作用

在弯箱梁上设置横隔板是十分必要的,它能起到传递扭矩的作用。本桥 21 m 跨在跨中设置一道横隔板,35 m 跨设置三道横隔板,另外在各墩处还设置了加厚横隔板。下面就横隔板所起到的作用,进行较详细的分析。

表 1 为最大负弯矩影响线上,对汽车内外侧加载时,各支座上的反力(支座号见图 3)受压为正,受拉为负。从图中看出,汽车偏内侧加载时内侧支座(1 号、7 号)受压,而外

侧支座（3号、9号）受拉。汽车偏外侧加载时，外侧支座（3号、9号）受压，内侧支座（1号、7号）受拉。无论是汽车内侧加载、还是外侧加载，有横隔板时的端部支座反力（1号、3号、7号、9号）均比无横隔板时的反力大。加横隔板后，活载下支座反力最大可提高17%。7号、9号支座反力平均提高14.8%，1号、3号支座反力提高9.7%。另外4号、5号、6号为中墩支座反力，有或无横隔板对其影响均较小。可见横隔板的传递扭矩作用是明显的。

表2为最大负弯矩影响线上，挂车内外侧加载时各支座产生的反力，其中各符号的意义同表1。由于挂车荷载位置比较靠近1号、3号支座，因此1号、3号支座反力变化明显。有横隔板时，挂车活载下支座反力最大可增加21.9%，1号、3号支座反力平均增加16.0%。

由以上分析可见，横隔板能起到传递扭矩作用。有横隔板后，靠活载位置近的一端，内外侧支座反力均可比无横隔板的内外侧支座反力提高15%左右。

最大负弯矩时汽车加载支座反力表（单位：kN）表 1

支 座 号	内 侧 加 载			外 侧 加 载		
	无横隔	有横隔	增加%	无横隔	有横隔	增加%
1	266.0	287.5	8.1	-305.2	-326.2	6.9
2	2.9	5.03	/	-6.9	-10.9	/
3	-294.8	-326.2	10.7	222.2	251.4	13.1
4	348.0	356.0	2.3	387.0	376.0	2.8
5	974.0	973.0	0.1	1006.0	1013.0	0.7
6	618.0	632.0	2.3	668.0	662.0	0.9
7	276.9	313.9	13.4	-322.0	-364.8	13.3
8	-40.6	-35.3	/	-55.6	-46.0	/
9	-318.1	-372.2	17.0	232.3	268.6	15.6

最大负弯矩时挂车加载支座反力表（单位：kN）表 2

支 座 号	内 侧 加 载			外 侧 加 载		
	无横隔	有横隔	增加%	无横隔	有横隔	增加%
1	160.8	188.3	17.1	-296.5	-326.7	10.2
2	-0.1	-5.4	/	-9.9	-9.3	/
3	-283.4	-324.8	14.6	128.8	157.0	21.9
4	612.0	627.0	2.5	647.0	649.0	0.3
5	621.0	622.0	0.2	646.0	652.0	0.9
6	128.0	134.0	4.5	132.0	139.0	5.3
7	140.1	147.0	4.9	-121.6	-126.3	3.9
8	15.5	14.9	/	-10.1	-11.7	/
9	-110.5	-115.6	4.6	131.3	145.1	10.5

3.3 独柱偏心调整

由于预应力连续梁的三个中墩均为独柱式支承，不能承受扭矩，故全部偏心荷载所产生的扭矩传至梁端支承，使端支承成为扭矩最大点。因此可通过调整独柱支承的偏心位置，来调整主梁扭矩，使其在全桥范围内的分布趋于均匀，获得较理想的主梁受力状态。

由 2、3 节分析可知，对于端部支座，活载偏于内侧加载，外侧支座出现拉力；偏外侧加载，内侧支座出现拉力。因此通过调整独柱的偏心位置，使端支承在恒载作用下受力均衡，在恒、活载共同作用下，梁端支座不出现拉力。

图 5 支反力计算结果 表 3

支反力单位为 kN			
支座号	$e=5.5\text{ cm}$	$e=5\text{ cm}$	$e=4.5\text{ cm}$
1	464.2	457.4	450.8
2	494.7	494.8	494.5
3	425.6	432.0	438.3
4	5967.0	5967.0	5968.0
5	6968.0	6968.0	6968.0

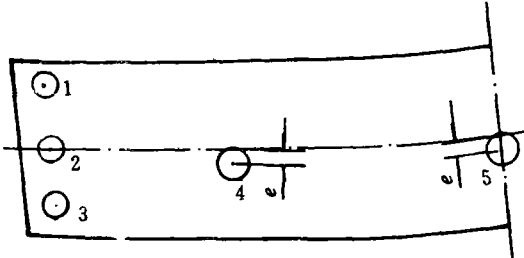


图 5 箱梁独柱偏心示意图

表 3 为箱梁有横隔板，恒载下支座反力情况，其中 e 值为独柱偏心位置（见图 5）。由表中可见，当 e 值由 5.5 cm 变化到 4.5 cm 时，中墩支座反力几乎没有什么变化（4 号、5 号），端支座中 2 号支座反力也没有什么变化，只有 1 号、3 号支座反力有变化。参考国内同类桥梁设计经验，取 $e=5\text{ cm}$ ，从前面提到的 16 种荷载工况的计算结果来看，箱梁端部支座反力叠加后，支座反力均未出现拉力，且具有一定的安全度。

4 QJX 综合程序计算分析

QJX 综合程序是桥梁线性静力计算程序。该程序在公路桥梁设计中已广泛应用。本文在应用该程序对预应力弯梁配置预应力筋束时，考虑了混凝土收缩、徐变和张拉预应力损失等因素的影响。计算中将单箱双室箱梁划分成三片独立的工形梁（图 6），其中 1* 腹板为弯箱梁内侧腹板，2* 腹板为弯箱梁中间腹板，3* 腹板为弯箱梁外侧腹板。应用 SAP 5 程序的计算结果确定各片工形梁所具有的单列活载的横向分配系数。

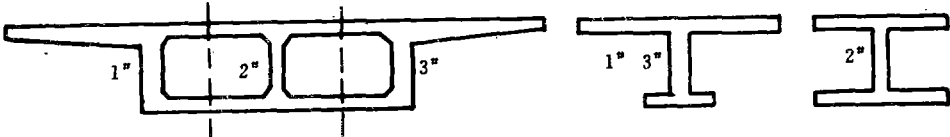


图 6 三片工字梁划分示意图

在应用 SAP 5 计算时，通过对 16 种荷载工况的计算结果分析得知，对于此弯箱梁无论是最大正弯矩还是最大负弯矩，均由双列汽车活载控制，因此采用汽车活载下腹板的弯矩来确定三片工形梁的横向分配系数。表 4 为各腹板的最大正弯矩和最大负弯矩。其中最大正弯矩位置在 35 m 跨的跨中，最大负弯矩位置在中墩墩顶处。由表中可见，汽车偏内侧加载，就正负弯矩值而言，1* 腹板均较 2*、3* 腹板的大很多。从汽车偏外侧加载看，外侧腹板受的弯矩比较大，说明活载横向分布的现象是明显的。表 5 为由表 4 求得各片梁的横向分配系数，其计算公式如下：

$$\gamma_i = \frac{M_i}{\sum_{i=1}^3 M_i} \quad \text{其中 } i \text{ 为腹板号 } i=1, 2, 3$$

换算成单列荷载后的横向分配系数，1* 工形梁的最大值为 1.240，3* 工形梁的最大值为

1.295。由于在SAP 5 计算中,只考虑了活载偏内外侧加载情况,没有考虑不控制设计的活载居中加载情况,因此实际设计中,按1*工形梁或3*工形梁的横向分配系数来考虑是可行的。

腹板弯矩(kN·m/m) 表 4

		自重+ 汽车内侧	自重+ 汽车外侧
正弯矩	1*	1.368	0.125
	2*	0.546	0.013
	3*	0.293	0.248
负弯矩	1*	-2.510	-0.590
	2*	-0.480	-0.03
	3*	-1.220	-1.141

横向分配系数 表 5

		双 列 汽 车		换算成单侧汽车	
		自重+汽车内侧	自重+汽车外侧	自重+汽车内侧	自重+汽车外侧
正弯矩	1*	0.620	0.324	1.240	0.648
	2*	0.247	0.034	0.495	0.067
	3*	0.133	0.642	0.266	1.285
负弯矩	4*	0.596	0.335	1.192	0.676
	5*	0.114	0.017	0.228	0.034
	6*	0.290	0.648	0.580	1.295

应用平面杆系程序计算时,三片工形梁长度分别为:1*111.05 m,2*112.25 m,3*113.65 m。首先计算素混凝土工形梁,确定各片工形梁截面的最大弯矩和最小弯矩,然后用以往采用的预应力估束公式进行配束。配束完成后,又在微机上对竖弯曲线参数进行反复调整和计算,然后绘出预应力束的布置图,并验算应力。由于空间预应力束预应力损失比较大,在平面杆系计算中,考虑了加大管道摩阻系数来弥补。按现行规范取用的橡胶管抽芯成型的摩阻系数 $\mu=0.55$,而实际设计中采用的是波纹管。其管道摩阻系数按规范取值仅有 $\mu=0.35$ 。设计中采用的是XM—7—12型大吨位锚具,可减小钢束及管道布置的工作量。另外各独柱位置上方的箱梁横隔板,在传递扭矩过程中起着很大作用,为了增加横隔板的抗扭刚度,对加厚横隔板采用了横向预应力,其锚具形式为XM—7—6,这样在全桥范围内采用了两种锚具形式。

5 独柱设计和球形支座

龙池立交桥是一座城郊立交桥。随着国民经济的发展和城市建设规模的不断扩大,匝道上下的通行能力和线型及视野开阔程度显得越来越重要,因此,中墩采用了独柱结构,独柱顶应用球形支座。

5.1 独柱设计

曲线桥采用独柱结构是为了增加桥下车辆通行的净空及整桥的美观性。大吨位球形支座的研制和生产给应用独柱创造了条件。本设计中采用的独柱为 $\phi 1.4$ m的外包钢管混凝土柱,可以充分发挥钢管和混凝土柱两种材料的各自优势,提高柱的截面和整体的受力性能。钢管混凝土柱在承受较大的竖向荷载时,由于混凝土的泊松比大于钢,钢管形成混凝土的套箍,混凝土在侧向受约束下,大大提高混凝土的后期使用性能及极限承载力。这一特点使钢管混凝土独柱有充分的潜力,适应于行驶重车和超重车的立交桥。

5.2 球形支座

球形支座适用于曲线桥、宽桥和坡桥。目前已在我国北京的西厢工程、首都机场高速公路、上海南浦大桥和扬浦大桥上采用。

球形支座是通过球冠衬板与球面四氟体之间的滑动来满足支座转动的需要。球型支座的位移通过上下座板与平面四氟板之间的滑动来实现。根据受力需要和对称性,在匝II预应力

弯箱梁的最中间的中墩柱顶,采用固定型球形支座。它是用在支座板上设置导向环约束各向位移,其他两个中墩柱顶的支座则设置导向槽来限制单方向的位移。

球形支座仅由球面来传力,作用在混凝土上的反力比较均匀。当球面支座滑动时,转动力矩小,其设计的最大转角可达 0.05 rad 以上。本设计中因垂直荷载较小,其支座转角为 0.01 rad 。由于球型支座仅用钢板、硅酯和四氟板,不存在橡胶老化对支座转动性能的影响,在桥梁维护过程中,只需作一般的检查。根据球形支座的设计特点,四氟板的设计应力通常较高,作用于支座底的混凝土的局部应力也较高。为防止混凝土受主拉应力而开裂,设计中在支承混凝土顶面之下及一定高度范围内应布置螺旋筋网并配置适当的钢筋。当支座安放在独柱上后,支座将与混凝土同时发生变形,则支座处于弹性支承状态。盆底的压应力分布呈钟乳形,最大压应力略小于刚性支承下的应力。为保证球形支座上顶板受力时处于水平位置,本设计中,在箱梁底做成混凝土楔形块。块底水平,块顶与梁底坡度一致。当受力时,支座仅承受垂直和水平力,符合球形支座的受力特征。施工图中选择的支座型号由其柱承受的垂直力作为控制值。

参考文献

- (1) 魏洪昌,王于晨,宋运来.预应力混凝土弯、坡、斜立交桥的设计和内力分析.中国土木工程学会混凝土工程委员会1993年学会论文集,1993,11.
- (2) 朱培京.桥梁静力线性计算程序(QJX)简介.交通部公路规划设计院,1991,10.
- (3) 庄军生,张士臣.球型支座的试验研究.铁道部科学研究院、交通部新津筑路机械厂,1989,7.