

北京西直门内部环路点支承异性弯板桥设计

刘慕清

(北京市市政工程设计研究总院, 北京 100045)

摘要:根据北京西直门内部环路点支承异型弯板桥的实际结构特点,以 Midas/Civil 大型结构分析有限元软件为工具,对空间的弯、坡、斜实体板桥进行了计算分析,提出板桥设计断面的确认及支座模拟参数,并提出了人行车道面、沉降组荷载工况、包络工况的设计概念。

关键词:点支承异型弯板桥;人行车道面;沉降组荷载工况;包络工况;北京市

中图分类号:U448.42 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-7716(2005)02-0044-06

1 西直门内部环路桥梁条件及线型简介

根据规划西直门交通枢纽将建成以轨道交通衔接换乘为主、地面公交衔接为辅的集地铁、城市铁路、国铁和公共汽车多种交通方式于一体的综合性大型客运交通枢纽。枢纽的主要交通设施包括城市 13 号铁路西直门站、2 号环线地铁西直门站、地铁 4 号线西直门站、14 条公交首末站及国铁北京北站等,规划总用地面积约 6 hm²。内部环路桥梁为二层公交专用道路,并与 13 号线、国铁北京北站站台同高程相结,地面层为外院设计的一层道路。设计平面图见图 1。

由于历史原因,我院接手西直门内部桥梁设计时,在全长 515 m 的公交环路桥梁范围内桥面到桥下高差仅为 5.15 m,并需保证桥下净空不小于 4 m;线型最差处曲线内侧半径仅为 8 m;90 度转弯地方行道宽度在 65 m 范围从 19.5 m 变为 8 m;在全桥宽 20.5 m 下,还需保证桥下与桥上平行的两上两下车道、车库出入口及转向要求;该桥几乎所有基础落在外院设计的地下车库、超市上,还有有一部分落在大的雨、污水及电力方沟上;桥梁墩柱的设计为保证美观,需与建筑地下柱网、现有城铁车站柱网相配。

鉴于上述原因,该桥无法采用梁式桥梁结构,预制钢箱梁也由于场地情况不能运到现场拼装,从景观、造价考虑也不能选用其他桥型,最后决定采用异型板桥。又由于桥下道路的影响,无法设置分联共用盖梁;桥上 9 联大部分处在不规则道路线型上,预应力的施加具有相当的困难,故采用普通钢筋混凝土

土异型板桥。这种结构没有盖梁、横梁及纵梁,有的桥梁设计师也把它称为“无梁板桥”,又有称为“菌形板桥”(Pilz bridge)。对于桥梁,动载影响很大,计算这种结构比较困难,因而困扰着点支承异型板桥的推广与使用。

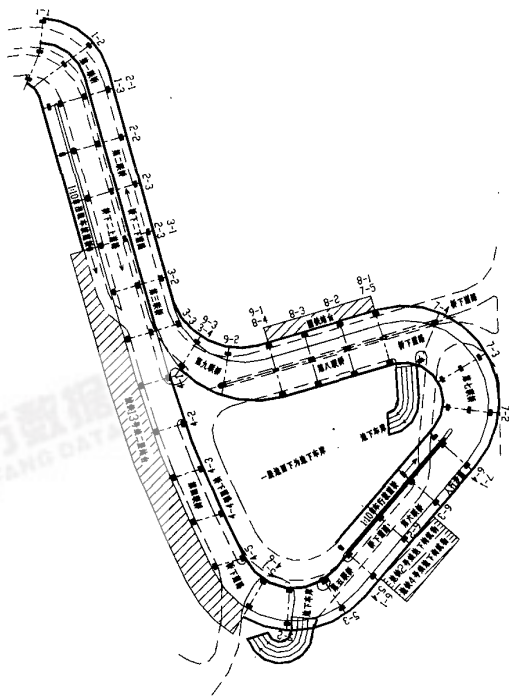


图 1 西直门交通枢纽平面图

2 关于 MIDAS/CIVIL 程序的一点介绍

该桥梁设计前,综合考虑了 Sap 90、Ansys、Midas/Civil 等几种能计算板、壳单元的程序,最后决定采用 Midas/Civil。它是韩国 POSCO 集团综合工程技术,在多位教授和工程技术人员的帮助下制作出来的并在国内外的 4 000 多个工程项目中应

收稿日期:2004-10-30

作者简介:刘慕清(1969-),男,河南驻马店人,工程师,从事道桥工程设计

万方数据

分析类型采用子空间迭代法。该联桥处在道路转弯处,墩柱的轴向也各不相同,在不影响工程精度的条件下,采用在整体坐标 $X-Y$ 平面的 0° 、 90° 两个方向的地震荷载。

3.1.4 墩柱不均匀沉降的考虑

连续异型板单元对不均匀沉降特别敏感,在以往的计算中,设计人往往采用跳轴来计算沉降所带来的影响。在该桥计算中,因为下部基础坐落在地下车库、超市上,墩柱的沉降按偏于安全设计。原拟采用逐墩沉降及其组合取最大,计算结果个别墩因沉降带来 400 多吨的竖向反力,太偏离实际而未被采纳,为此引入沉降组荷载工况的概念,即跳轴时各墩柱不一定同时沉降,而按跳轴后各轴分别沉降、组合沉降而取其最大值计算。具体到本题,7-2、7-4 轴分别沉降一次,再组合沉降一次,取其大值作为设计依据。

3.1.5 温度的选取

根据北京市(1951~1988 年)气象统计资料并对比 2001 年气象资料,确认一月份平均气温为 -4.6°C ,七月份平均气温为 25.8°C ,故采用系统温升 $+30^\circ\text{C}$,温降 -30°C ;按英国规范 B 5400 第 5.4 条执行,采用上下缘温度梯度为 $+10^\circ\text{C}$ 与 -10°C ,这与以往的设计没有太大的区别。混凝土收缩徐变的影响在 Midas/Civil 中专有计算,通过考题,基本满足精度要求,故收缩徐变的影响不作为相应于温度的降低来考虑,而通过程序本身功能来实现。

3.2 边界条件及断面的拟定

3.2.1 边界条件的考虑

现行的桥梁设计和施工规范没有曲线桥的内力分析方法和技术规定、设计参数;对弯桥的力学特性、温度、混凝土收缩、徐变还缺乏足够的认识,以往弯桥破坏多发生在支承体系及限位措施不当上。该桥为 147° 的弯、坡、斜、小半径桥,弯桥效应就会更加明显,为避免板体的爬移、扭转累积变形,墩梁固接或设置固定盆式支座应该是必然的选择,但在固接时无法释放墩顶的正弯矩,故该桥在 1、5 号轴采用板式橡胶支座,2、3、4 号轴采用盆式固定抗震支座。之所以设置这么多盆式支座,是由于该桥墩柱较矮、较刚,必然带来较大的地震荷载,为了让更多的墩柱参与分担地震荷载而用。

对于空间结构而言,墩柱与梁体连接条件,柱底及支座刚度的模拟至关重要。该桥设计由于桥下基础为框架结构的地下车库,它的刚度要远大于单体

的墩柱,地下车库的设计方不能提供墩柱底部变形数据,故模拟为柱底固接;板式橡胶支座刚度采用三维弹性连接器来模拟计算:

单元局部坐标系 x 轴方向刚度(该桥为支座竖向刚度计算):

$$SD_x = EA/l \quad (1)$$

单元局部坐标系 y 、 z 轴方向刚度(该桥为支座横、纵刚度计算):

$$SD_y = SD_z = GA/l \quad (2)$$

单元局部坐标系 x 轴方向转动刚度(该桥为支座平面内转动刚度计算):

$$SR_x = GI_p/l \quad (3)$$

单元局部坐标系 y 轴方向转动刚度(该桥为支座横向转动刚度计算):

$$SR_y = EI_y/l \quad (4)$$

单元局部坐标系 y 轴方向转动刚度(该桥为支座纵向转动刚度计算):

$$SR_z = EI_z/l \quad (5)$$

式中: E 、 G 为板式橡胶支座抗压、抗剪弹性模量; A 为支座承压面积; I_y 、 I_z 为支座承压面对局部坐标轴 y 、 z 的抗弯惯性矩; I_p 为支座抗扭惯性矩; l 为支座净高。

固定盆式支座以较大的刚度约束板体的位移而放松对转动的约束,故模拟在墩顶设置一个横、纵、竖三维抗压、抗剪的大值,各方向抗弯的小值,即 $SD_x = SD_y = SD_z = +\infty$,而 $SR_x = SR_y = SR_z = 0$ 的一个弹性连接。

3.2.2 异型板桥板厚的确认

根据以往的工程经验,普通钢筋混凝土板中跨应不大于 18 m,边跨不大于 13 m,矢跨比为 $1/25 \sim 1/30$ 。具体到第七联桥而言,内弧半径仅有 13.4 m,外弧却达到 33.4 m,跨径概念很难确认,最后采用钢筋混凝土板的冲剪计算来确认其厚度。在实体板的计算中,结构自重一般占荷载效应的 $60\% \sim 75\%$,板体过厚会造成浪费,过薄则结构本身强度不能满足要求。

通过试算,确认墩顶最大的反力在 900 t 左右,按使用能力来计算冲剪有如下公式(配置箍筋和斜筋时):

$$F \leq 0.6 R_l U_m h_0 \quad (6)$$

式中: F ——墩顶按使用能力组合后最大集中反力值

U_m ——距集中反力作用面积周边 $h_0/2$ 处的周长

R_1 ——混凝土抗拉设计强度
计算简图见图3。

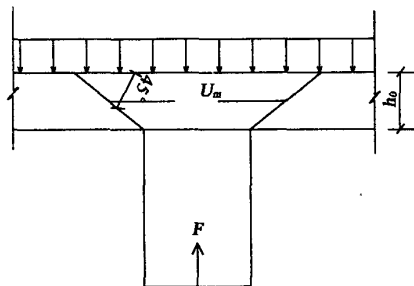


图3 计算简图

该桥中桥墩断面设计为 $1\text{ m} \times 2\text{ m}$, 墩顶由于桥下道路的影响, 无法设置托盘, 核算后采用 0.9 m 厚的板体。梁体的配筋在该联桥不是控制, 但在其他联桥梁中, 0.9 m 的板厚配筋相当困难, 为了结构统一及美观, 西直门内部环路桥梁均采用 0.9 m 厚的板体。

3.2.3 墩柱尺寸的选定

异型板桥在满足墩柱本身受力及梁体冲剪的前提下, 应尽可能做到较小的尺寸, 一方面是节省材料, 另一方面也是减少大截面、矮墩柱刚度过大带来的较大的地震、温度效应。第七联计算中, 最不利的情况下 7-4-2 墩按使用功能组合下最大轴力为 867.9 t , 相应的墩柱短轴方向的弯矩达到 $591.4\text{ t} \cdot \text{m}$, 结构配筋时, 混凝土容许压应力及钢筋的容许应力在 $1\text{ m} \times 2\text{ m}$ 的墩柱尺寸下均达到设计的极限。为桥下的美观、地下车库的利用, 西直门内部环路桥梁均采用 $1\text{ m} \times 2\text{ m}$ 抹角墩柱。

3.3 计算成果

3.3.1 主梁的计算结果

完成以上的分析后, 对该桥进行建模分析, 得到每个荷载子项效应, 再按《城市桥梁设计荷载标准》(CJJ77-98) 进行荷载组合。鉴于该桥下部基础落在建筑结构上, 弯板桥本身受力的分配也不是很明确, 于是引入荷载组合包络设计的概念。与弯矩包络图不同的是, 设计人单设置一个包络工况, 这个工况包络的是所有荷载组合下每个单元内力、应力及变形的最大、最小值, 并以这一工况来控制结构配筋。图4为包络工况下局部坐标系 M_{xx} 的最小内力图(内力具有正、负号, 不为绝对值最小)。

当然, 对于一个三维空间结构而言, 实体板体还存在 M_{xx} 的最大内力图、 M_{yy} 的最小内力图、 M_{yy} 的最大内力图以及扭转变矩 M_{xy} 的最小、最大内力图等等, 限于篇幅, 不再展示。

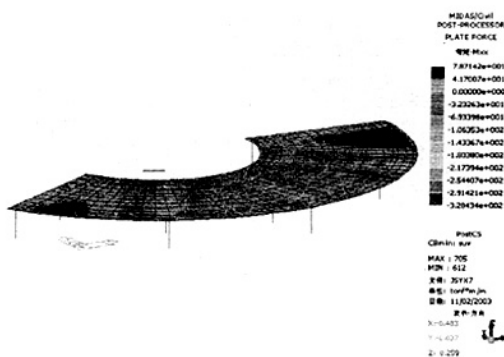


图4 包络工况下 M_{xx} 的最小内力图

有了这些数据, 我们就可以进行配筋计算, 我们由单元弯矩、扭矩计算主弯矩及其方向, 再由主弯矩及其方向求出配筋弯矩, 具体公式如下:

$$M_1 = \frac{M_{xx} + M_{yy}}{2} + \sqrt{\left(\frac{M_{xx} - M_{yy}}{2}\right)^2 + M_{xy}^2} \quad (7)$$

$$M_2 = \frac{M_{xx} + M_{yy}}{2} - \sqrt{\left(\frac{M_{xx} - M_{yy}}{2}\right)^2 + M_{xy}^2} \quad (8)$$

$$\alpha = \arctan\left(\frac{M_1 - M_{xx}}{M_{xx}}\right) \quad (9)$$

$$M_x = M_1 \cos^2 \alpha + M_2 \sin^2 \alpha + (M_1 - M_2) \sin \alpha \cos \alpha \quad (10)$$

$$M_y = M_1 \sin^2 \alpha + M_2 \cos^2 \alpha + (M_1 - M_2) \sin \alpha \cos \alpha \quad (11)$$

式中: M_{xx} ——单元 X 轴方向的弯矩

M_{yy} ——单元 Y 轴方向的弯矩

M_{xy} ——单元扭矩

M_1 、 M_2 ——单元最大、最小弯矩

α —— M_1 与 M_{xx} 方向的夹角

M_x ——计算 X 轴方向的配筋弯矩

M_y ——计算 Y 轴方向的配筋弯矩

从公式(10)、(11)我们可以看到, 划分单元时尽可能把局部坐标轴方向与配筋方向叠合, 此时 $\alpha \approx 0$, $M_x \approx M_1 \approx M_{xx}$, $M_y \approx M_2 \approx M_{yy}$, $M_{xy} \approx 0$ 。这样在适当调高配筋的前提下就可减少配筋时琐碎麻烦的后处理工序。

Midas/Civil 可以在任意配筋断面划一剖断线, 剖断线上的数据均为某一内力在此断面线的投影, 如何把剖断线上的数据通过程序计算成为配筋弯矩数据, 这是此类程序需要解决的问题, 但是设计人可以通过控制剖断线位置来取得需要的数据。下面从 M_{xx} 的最小内力图(14, 15, 0)到(20, 25, 0)设置一剖断线, 得到如图5数据。

3.2.2 墩柱的计算结果

该桥墩柱角度各不相同, 对于空间结构各方向贡献的刚度差异很大, 下面仅就第四轴墩柱受力分

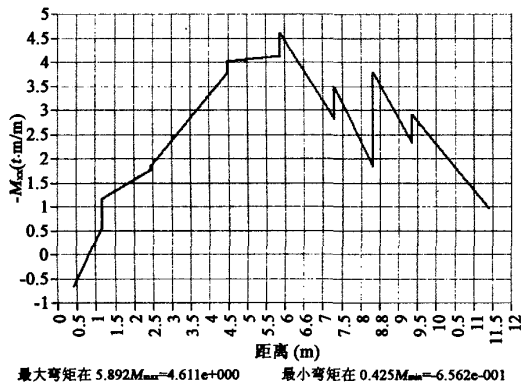


图 5 剖面线 #5

析结果列表如表 1 所示。

从表 1 中我们可以看出：

(1)在同一系统温度下,墩柱产生内力的大小与方向各不相同。其原因在于温度零点不在结构体的中心,而位于曲线桥内弧线 7-3-1 墩柱附近。

具体位置见图 6：

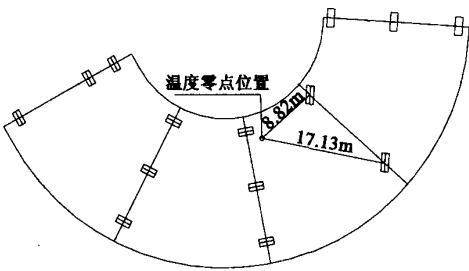


图 6 曲线桥温度零点位置

从 7-4-1、7-4-2 墩柱在温升的情况, $q_{7-4-1} = \sqrt{136.5^2 + 66.4^2}$ 大于 $q_{7-4-2} = \sqrt{27.3^2 + 140.8^2}$, 而从两墩柱中心距温度零点的长度来看, 7-4-2 墩柱要大

于 7-4-1 墩柱, 如果从平面杆系角度来看, 应该 q_{7-4-1} 大于 q_{7-4-2} , 但是考虑刚度的方向性, 很显然 7-4-1 墩柱要远大于 7-4-2 墩柱, 这就是 7-4-2 墩柱温度力大于 7-4-1 墩柱的原因。校核其余墩柱均显示出内力大小与墩柱刚度、距温度零点的长度有密切关系, 当然柱梁的关系也会对此产生影响。

(2)在同一温度梯度的作用下, 墩柱产生内力的大小与方向各不相同。在温升 30℃ 的情况下, 7-4-1 墩柱较 7-4-2 墩柱产生较大的内力, 且内力方向相反。原因在于内侧墩柱较为密集、局部刚度大, 自然要吸引较大的梯度力, 外侧的拉力于空间结构内力的分配有很大关系, 这是平面杆系结构不能计算得出的。

(3)在同一支座轴沉降中, 墩柱产生的内力不相同。从表 1 可以看到, 不管在何种沉降工况下, 7-4-1 墩柱吸引的内力都要大于 7-4-2 墩柱, 研究各轴墩柱情况, 可以看到曲线桥内弧侧墩柱对沉降比较敏感, 由此引起的内力绝对值要比外侧大。原因也在于内侧墩柱较为密集、局部刚度大, 自然要吸引较大的沉降力。

(4)在同一地震方向下, 墩柱产生的内力有些差异。在相同的外部条件下, 更多地取决于它本身在全桥不定方向刚度贡献的大小、取决于桥梁各墩局部刚度大小、取决与墩顶在空间分配的质量大小等等。如果单从墩顶恒载来看, 是不能得出相应的系数关系, 如 7-4-1 墩柱、7-4-2 墩柱 (两者刚度相同) 在 R_x 、 R_y 的地震力有一定的关系而没有必然的关系。

4 设计体会

(1)随着计算机技术的发展及程序的完善, 异型

表 1 第四轴墩柱受力分析结果

	轴力(t)		剪力(墩柱 长轴线方向)(t)		剪力(墩柱 短轴线方向)(t)		弯矩(墩柱 长轴线方向)(t·m)		弯矩(墩柱 短轴线方向)(t·m)	
墩号	7-4-1	7-4-2	7-4-1	7-4-2	7-4-1	7-4-2	7-4-1	7-4-2	7-4-1	7-4-2
系统温升 30℃	.....	.....	136.5	-27.3	66.4	140.8	573.2	-114.4	278.7	591.4
系统温降 30℃	.....	.....	-136.5	27.3	-66.4	-140.8	-573.2	114.4	-278.7	-591.4
温度梯度(+10℃)	51.2	-8.3	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
温度梯度(-10℃)	-51.2	-8.3	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
奇数轴支座沉降 5 mm	90.3	48.3	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
偶数轴支座沉降 5 mm	-90.8	-7.8	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
R _x 方向地震力	.....	.....	229	79.1	32.2	25.4	96.1	331.5	134.6	105.7
R _y 方向地震力	.....	.....	134.6	167.8	19.7	9.4	564.1	703.2	82.3	39.2
恒载总反力	-358.1	-674.9	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
移动荷载(Max)	-11.7	-11.1	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
移动荷载(Min)	-146.7	-176	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
R _x 方向地震力组合内力	-358.1	-674.9	22.9	79.1	32.2	25.4	96.1	331.5	134.6	105.7
R _y 方向地震力组合内力	-358.1	-674.9	134.6	167.8	19.7	9.4	564.1	703.2	82.3	39.2
组合包络内力(Max)	-203.9	-647.6	136.5	27.3	66.4	140.8	573.2	114.4	278.7	594.1
组合包络内力(Min)	-647.1	-867.9	136.5	27.3	66.4	140.8	573.2	114.4	278.7	594.1

城市地下通道中异形结构箱涵的计算与分析

刘 斌, 杨 兵, 赵林强

(杭州市城建设计研究院有限公司, 浙江杭州 310001)

摘 要:通过对一块异形结构箱涵的计算, 比较了传统计算方法与实体有限元计算的差异; 分析了箱涵出入口断面与道路路线夹角在不同角度下的箱涵上部结构受力情况, 给出了相对合理的最小夹角值; 对出入口处有斜交的箱涵结构添加栅格梁进行计算, 分析了栅格梁对箱涵结构受力的影响和作用。

关键词:箱涵; 异形; 有限元法; 结构分析; 杭州市

中图分类号: U449.82 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-7716(2005)02-0049-03

1 工程简介

本文以杭州市钱江新城两翼“城市阳台”工程为背景, 进行箱涵结构部分的分析计算与设计。钱江新城是杭州市发展进入钱塘江时代的象征, 是未来杭州的中央商务区, 而“城市阳台”又是钱江新城重要的组成部分, 集景观、餐饮、观光、停车等多项功能为一体。箱涵部分又是“城市阳台”最主要的结构物, 具有构造复杂, 技术难度高等特点。该箱涵内部为双向六车道, 部分区段加宽为七车道, 箱涵内净跨径最大达到 16.6 m。箱涵顶板厚为 1.0 m, 底板厚为 1.1 m, 两侧墙厚为 0.8 m, 中间墙厚为 0.8 m。

2 计算方法

对箱涵结构计算的常用方法通常是取一段单位

长度的标准断面, 用结构力学方法进行分析计算。但该方法仅适用于标准阶段的箱涵计算, 且不能得出结构细部的受力情况。本文利用有限单元法, 对箱涵的异形节段进行实体建模分析。

取箱涵标准段用结构力学方法和实体有限元方法分别进行计算, 比较两种计算所得的结果, 对实体有限元计算的结果进行效度检验。箱涵标准断面如图 1 所示, 图中单位为 cm。本文仅讨论上部结构的受力, 不考虑箱涵在天然地基础上的受力。

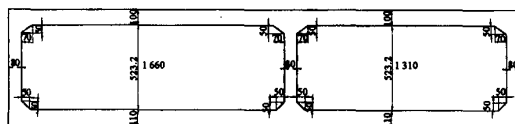


图 1 箱涵标准端面图

图 2 比较了用结构力学法和实体有限元法分别计算的箱涵顶板顶面正应力, 其中 X 坐标为以箱涵中墙中心为 0 点的距离值, 单位为 m; Y 坐标为箱涵顶板顶面正应力值, 单位为 MPa。

收稿日期: 2005-02-05

作者简介: 刘斌(1980-), 男, 宁夏固原人, 助理工程师, 从事市政桥梁设计工作。

弯板桥在计算与设计, 不再琐碎麻烦。有限元法程序在动载影响上得到了一定的解决, 如 Ansys、Midas/Civil 等大型综合程序, 这与以往采用 Sap-5 等程序采用静载的比例系数模拟动载有了很大的发展。

(2) 异型板桥在构造上十分机动灵活, 适应性强。上部板身可以适应弯、坡、斜以及许多不规则的道路平面; 下部墩柱更可以结合当地条件合理地布置, 以求得桥下最好的排水和行车净空等等, 是一个值得推广的桥型。

(3) 小半径曲线板桥的受力不能采用平面杆系结构来计算, 简单的平面分析不能解决空间结构力的分配

(4) 对于受力不明确的弯、坡、斜、小半径桥, 设计要考虑全面, 按最不利的组合来进行设计。该桥设计中引入的人行道面、沉降组荷载工况、包络工况就是在这方面的尝试, 当然这与该桥具体情况有关, 还很成熟, 希望起到抛砖引玉的作用。

(5) 应加强异型板桥的试验研究, 建立一套板桥的承载能力、冲剪计算、结构配筋等方面的规范。

参考文献

- [1] 中华人民共和国交通部标准 TJT004-89, 公路工程抗震设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 1999.
- [2] 沈中治. 点支承异型板桥设计技术规定 (BSY-GQ02-92) [S]. 北京市市政工程设计研究总院, 1992.
- [3] 王伯惠、张亚军. 无梁板桥[M]. 人民交通出版社, 1998.