

南京地铁 U 形梁的预制技术与应用

作者：唐玉斌，朱立，李昊

（南京城市地铁实业集团有限公司，江苏南京 210038）

[摘要] 南京地铁二号线东延线高架上部结构采用了 U 形梁形式，它具有投资省、适应能力强、外形美观等特点，但对设计与施工也提出了较高的要求。文章在分析 U 形梁的结构与性能特点基础上，对 U 形梁的设计技术及施工工艺进行了全面、详细的介绍，并阐述了 U 形梁施工设计的创新点。

[关键词] 地铁；高架；U 形梁；预制技术；施工工艺

[中图分类号]U448.28 [文献标识码]B [文章编号]1005-6270（2010）

05-0034-03

0 引言

随着城市的大型化的发展，对交通的通畅、快捷提出了更高的要求，轨道交通成为解决城市交通难题的首选。近年来从国外引进了 U 形梁的技术，U 形梁是一种下承式预应力混凝土桥梁，它由底板、腹板及横梁等部分组成，它具有轨面标高低、适应范围广、节约建材、施工周期短、节省投资、外形美观等特点，还能达到降噪的目的。但由于目前 U 形梁在国内轨道交通工程中应用较少，技术尚不成熟，在国内也仅在上海地铁 M8 号线由法国设计应用过。因此本文结合南京地铁二号线东延线工程，对 U 形梁的设计技术及施工工艺进行详细阐述，为 U 形梁在城市轨道交通工程中的推广应用提供依据和参考。

1 工程概况

南京地铁二号线东延线线路总长 1 185 m，位于仙林大道北侧 20 m 范围内绿化带中，跨越土城头路和仙隐北路，对周边现建、构造物不造成影响。这是南京地铁首次架设 U 形梁，此 U 形梁是我国首次自主研发，自主设计、施工的新型技术产品，技术含量相当高，施工难度非常大。桥梁段线路最小平曲线半径为 1 200 m，最小竖曲线半径为 3 000 m，桥梁段线路最大纵坡 2.3145%。本段高架桥采用整孔预制预应力混凝土 U 形梁，有 25 m 和 18 m 两种跨度，25 m 梁有 88 片，18 m 梁有 8 片。地铁架设的 U 形梁实物图如图 1 所示。



图 1 南京地铁架设的 U 形梁

2 工程用 U 形梁的设计

2.1 U 形梁的设计原则

①设计速度：最高行车速度按 80 km/h 计。

②设计荷载：综合考虑了恒载、车辆荷载以及其它动荷载等，其中：恒载分为结构构件自重及附属设施重（二期恒载），二期恒载按 33.7 kN/m 的情况设计；地铁列车荷载根据四动两拖车编组设计，并考虑动力系数的影响；动荷载包含列车的离心力、横向摇摆力、风力、温度应力、接触网柱底荷载；发生故障产生的脱轨荷载、对边墙的撞击力；另外也考虑了地震、更换支座和施工荷载。

③设计参数：梁体在列车静荷载作用下，其竖向挠度值不大于计算跨度的 1/2000；梁体的横向自振频率不小于 90/L，L 为梁体计算跨度；纵向预应力钢筋采用钢绞线，用自锚式拉丝体系锚固，采用夹片式锚具；各项常规设计指标见表 1。

| 序号 | 项目 | 检算条件 | 控制条件 |
|----|------------------|----------------|--|
| 1 | 设计安全系数 | 强度安全系数 | 运营荷载下 $K \geq 2.0$ 安装荷载下 $K \geq 1.8$ |
| 2 | | 抗裂安全系数 | 运营荷载下 $K_I \geq 1.2$ 安装荷载下 $K_I \geq 1.1$ |
| 3 | 预应力钢绞线应力 /MPa | 预加应力时的锚下控制应力 | $\sigma_{an} \leq 0.75f_{pk}$ |
| 4 | | 传力锚固时的控制应力 | $\sigma_p \leq 0.65f_{pk}$ |
| 5 | | 运营荷载下控制应力 | $\sigma_p \leq 0.60f_{pk}$ |
| 6 | 钢筋应力/MPa | 疲劳荷载作用下钢束应力幅 | $\Delta\sigma_p \leq 140$ |
| 7 | | 疲劳荷载作用下带肋钢筋应力幅 | $\Delta\sigma_s \leq 150$ |
| 8 | 混凝土应力/MPa | 传力锚固时压应力 | $\sigma_c \leq 0.75f_c$ |
| 9 | | 传力锚固时拉应力 | $\sigma_{ca} \leq 0.70f_{ca}$ |
| 10 | | 运营荷载下压应力 | $\sigma_c \leq 0.50f_c$ |
| 11 | | 运营荷载下拉应力 | $\sigma_{ca} \leq 0$ |
| 12 | | 运营荷载下最大剪应力 | $\tau_c \leq 0.17f_c$ |
| 13 | | 抗裂荷载下主拉应力 | $\sigma_p \leq f_{ct}$ |
| 14 | | 抗裂荷载下主压应力 | $\sigma_p \leq 0.60f_c$ |

2.2 U 形梁的结构设计

针对该工程特点、技术难点要求，U 形梁结构设计如下：

①本设计为整孔预制后张法预应力混凝土 U 形简支梁，梁场预制梁体，利用运梁车运送到桥位架设，梁体最大运架重量 155 t。②梁跨 25 m 和 18 m，梁宽 5.205 m，梁高 1.8 m，梁体底板最薄处为 26 cm。③梁体腹板顶部横坡：1%，桥面横坡分别为 1%和 1.14%。

④吊装孔位置：在移梁、架梁等施工过程中，采用桥面板预留吊装孔的方法进行梁

体的吊装。梁体架设到桥位后，采用无收缩混凝土将吊装孔封堵，并进行局部防水及保护层的施工。图 2 为 U 形梁跨中结构截面图。另外，本工程中取消了 U 形梁的接触网莲花座。U 形梁上接触网立柱设置的传统做法，一般是将立柱植根于桥面，因此会形成一个突台，俗称“莲花座”（见图 3）。本工程在优化了传统的 U 形梁设计思路以及引入单元板设计概念后，将接触网立柱设置于 U 形梁翼缘板上方，取消了“莲花座”，相比传统的 U 形梁节省了建材、美化了外观。

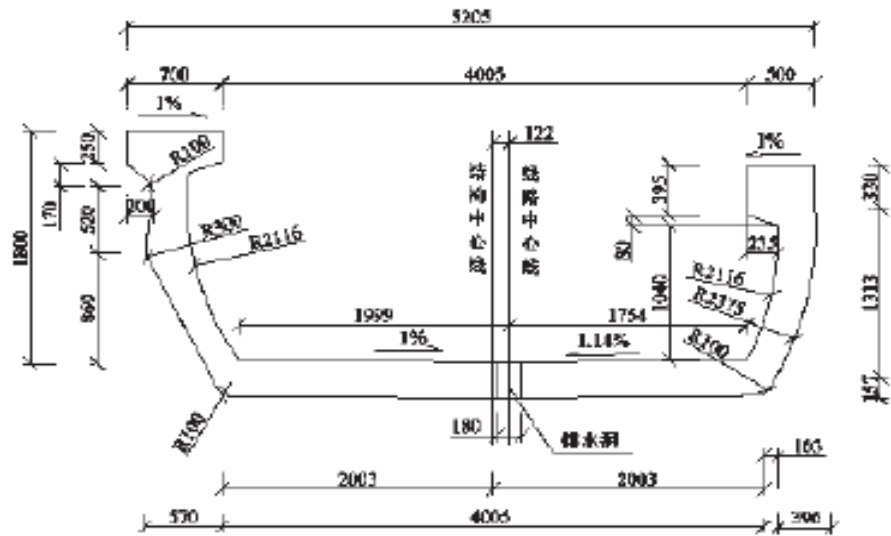


图 2 25 mU 形梁跨中结构截面图

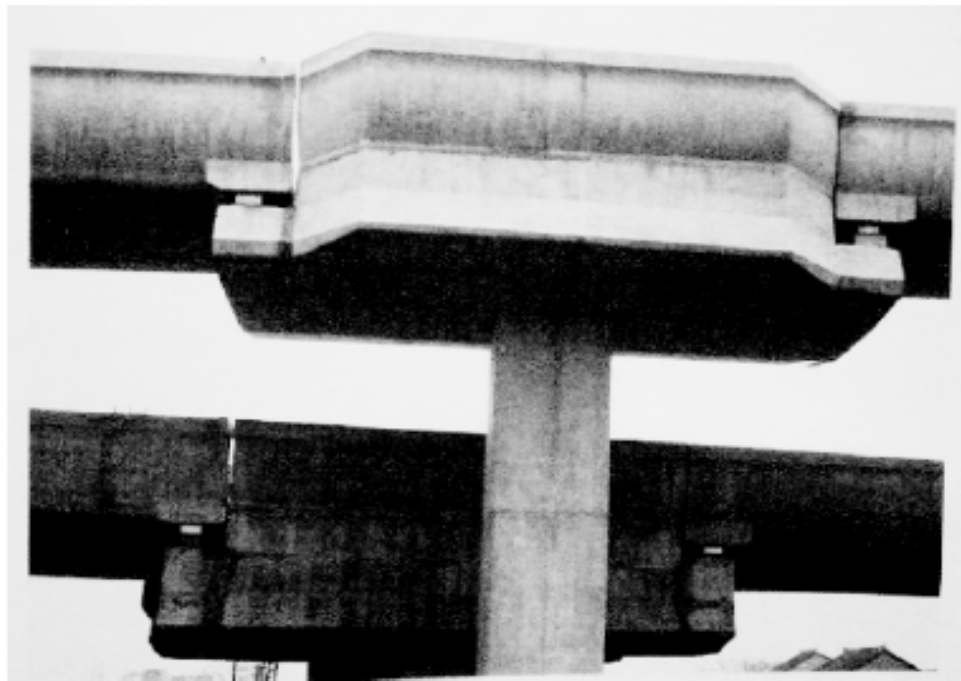


图 3 上海 8 号线 U 形梁莲花座实景图

2.3 U 形梁的材料选择

根据 U 形梁的设计要求和结构特点，南京地铁用 U 形梁所选用的材料如下：

- ①梁体混凝土强度等级为 C55，封锚采用强度等级为 C55 的无收

缩混凝土。②预应力钢绞线采用极限抗拉强度 $f_{pk}=1\ 860\ \text{MPa}$ 的高强低松弛钢绞线，技术条件应符合《预应力混凝土用钢绞线》(GB/T 5224-2003)。③预应力钢束锚具采用夹片式锚具，锚垫板采用配套锚垫板，张拉千斤顶采用配套千斤顶。④管道形成采用直径为 70mm 和 80mm 的金属波纹管成孔。⑤Q235 钢筋应符合《钢筋混凝土用热轧光圆钢筋》(GB13013-91)，HRB335 钢筋应符合《钢筋混凝土用热轧带肋钢筋》(GB1499-1998)，并满足《铁路桥涵钢筋混凝土和预应力混凝土设计规范》(TB10002.3-2005)对含碳量的要求，即 $C+Mn/6$ 应不大于 0.5%。⑥波纹管中水泥强度不低于 M40，并掺入阻锈剂。

3 U 形梁施工的关键工艺

高架桥 U 形梁严格按照《铁路桥涵施工规范》(TB10203-2002)及南京市的有关规定施工。混凝土骨料不含石膏和有机矿物质成份，拌合用水采用无侵蚀性水，混凝土碱含量符合《铁路混凝土工程防碱-骨料反应技术条件》。为提高结构耐久性，采用性能指标满足要求的高性能混凝土。混凝土的配合比见表 2。

表 2 混凝土的配合比及性能

| 混凝土各材料用量/kg/m ³ | | | | | | | | 坍落度 /mm | 抗压强度/MPa | | | | 弹性模量/GPa | | | |
|----------------------------|-----|-----|-----|------|------|-----|-----|------------|----------|------|------|------|----------|------|------|--|
| 水泥 | 粉煤灰 | 水 | 砂 | 石 | 外加剂 | 纤维 | 1 d | | 3 d | 7 d | 28 d | 1 d | 3 d | 7 d | 28 d | |
| 400 | 90 | 165 | 710 | 1064 | 5.39 | 0.9 | 200 | 32.7 | 49.8 | 60.4 | 75.0 | 27.9 | 32.9 | 40.9 | 42.0 | |

注：外加剂为江苏博特新材料有限公司生产的聚羧酸系高效减水剂 JM-PCA。

3.1 钢筋捆扎

梁体钢筋整体捆扎，先在底模上捆扎钢筋骨架，在绑扎的同时预埋好波纹管，波纹管用定位钢筋定位固定，确保波纹管在梁内设计尺寸。

梁体钢筋最小净保护层均为 35 mm，

且绑扎铁丝的尾端不应伸入保护层内。所有梁体预留孔处均增设相应的螺旋钢筋进行加强。为确保腹板、底板钢筋的位置准确，可采用增加架立筋数量或增设 W 形或矩形的架立筋等措施，梁体钢筋密度较大，且定位精度要求较高，不同种类钢筋捆扎的先后顺序及位置尤为重要，将影响整体钢筋准确定位。

3.2 拆模

拆模时的混凝土强度应达到设计强度的 60%以上；梁体混凝土芯部与表层、表层与环境温差均不宜大于 15 ℃，并保证梁体棱角完整。

拆除端模后，松开内模和外模进行初

张拉，待梁体初张拉后可移出内模和拆除外模。气温急剧变化时不宜拆模。拆模后做好对混凝土的养护，防止出现收缩裂缝。

3.3 混凝土浇筑

混凝土拌合物运输到施工现场，应逐车进行坍落度检测，检查颜色有无变化，观察有无分层离析现象，并作好记录，对工作性能和颜色不符合要求的拌合物严禁使用。U 形

梁混凝土浇筑流程：先底板，从一侧梁端向另一侧梁端依次浇筑第 1 层混凝土（20 cm 厚），采用 50 型振动棒进行逐段插捣，振捣密实后浇筑第 2 层混凝土（10 cm 厚），从两侧腹板内进行浇筑，至底板与腹板夹腋处混凝土泛浆、密实，底板混凝土收水、初抹面静停约 1

h, 分层浇筑腹板混凝土, 振捣密实后腹板顶面收水、抹面。浇筑顺序: 先底板、后腹板, 水平分层浇筑。

3.4 预应力筋张拉和锚固

预应力张拉按初张拉和终张拉两个阶段进行。预制梁带模张拉时, 内模和外模应松开, 不应对梁体压缩造成障碍。初张拉在梁体混凝土达到设计值 60%后进行, 终张拉在梁体混凝土达到 100%及弹性模量达到 90%后进行, 并且龄期不少于 8 d, 所有预应力束都张拉到 1 300 MPa。预施应力采用两端同步张拉, 并左右对称进行, 预施应力采用双控措施, 张拉过程中保持两端的伸长量基本一致。生产初期, 要对 U 形梁进行管道摩阻、喇叭口摩阻等预应力瞬时损失测试, 以保证预施应力准确。张拉期间应采取措
施避免锚具、预应力筋受雨水、养护水浇淋, 防止锚具、预应力筋出现锈蚀。

3.5 管道压浆

终拉完成后, 在 48 h 内进行管道真空辅助压浆, 压浆时及压浆后 3 d 内, 梁体及环境温度不得低于 5 °C。压浆采用高性能无收缩防腐灌浆剂, 压入的水泥浆应饱满密实。压浆前管道内应清除杂物与积水。预应力管道压浆采用真空辅助压浆工艺, 同一管道连续压浆一次完成。确认管道出浆浓度与进浆浓度一致时, 方可封闭保压, 压浆最大压力不超过 0.60 MPa。水泥浆搅拌结束至压入管道的时间间隔不超过 40 min。冬季压浆应采取保温措施。

3.6 封锚

等灌注的水泥浆凝固之后即可进行封锚工作。封端填充采用补偿收缩混凝土， 并利用一端带钩一端带有罗纹的短钢筋安装在锚垫板螺栓孔， 与锚穴内钢筋网捆绑在一起， 保证封端混凝土与梁体连为一体， 封锚前对锚槽进行凿毛处理， 封锚后进行防水处理。

3.7 预埋件处理

所有预埋件保证位置准确， 外露部份进行热浸镀锌防锈处理。支座预埋钢板应保持平整。预埋钢筋应捆扎牢固。

3.8 U 形梁的存、运及施工架设

梁段吊装采用钢棒插入吊装孔的方式， 保证吊装时各吊装点受力平衡， 吊点设在梁端腹板内侧。在存、吊、运梁的过程中， 应保证各吊点或支点受力均匀， 梁体四支点位于同一平面上， 误差不大于 2 mm。梁起顶、吊运、存放时的最大悬臂长度为 0.9 m， 施工中必须采取严格措施保证结构稳定。架梁时 U 形梁的临时支点设在支座与梁端范围内。图 4 为现场 U 形梁的存放与吊装。



图 4 U 形梁的存放、吊装

4 结语

预应力混凝土 U 形梁具有投资省、适应能力强、外形美观等特点， 经精心设计和施工安装的南京地铁二号线东延线 U 形梁是安全可行

的。经工程应用，不仅取得了良好的经济效益和社会效益，而且还为 U 形梁在地铁高架线路上的推广应用提供了重要参考价值和积累了丰富的施工经验。