

摘要: 该文以上海轨道交通某高架区间 U 形梁结构工程为研究对象, 基于原型梁的加载实验, 验证 U 形梁结构的可靠性。结合 U 形梁的特点, 介绍了施工中梁体混凝土、预制模具体系、预应力加载、U 形梁运输、架设过程中难点及关键工艺, 对类似工程的设计与施工具有参考价值。

关键词: 轨道交通; 高架; U 形梁; 试验研究; 上海

## 0 引言

据文献[1-3]所述, U 梁是适合于轨道交通高架结构要求, 具有较小建筑高度的结构型式之一。U 梁跨径的变化只影响两侧主梁的梁高, 基本上不影响 U 梁道床板面的建筑高度, 便于轨道交通系统在线路纵断面上作定线布置。轨道交通车辆行驶于 U 梁两腹板中间, 轮轨走行系统的噪声受到两侧主梁上翼缘及腹板阻隔, 在一定程度上减少了车辆噪声对周围环境的影响, 相对箱形梁, U 梁无箱体共鸣噪声。两侧主梁能防止出轨列车倾覆下落, 给行车安全提供可靠的保证; 紧急情况下, 主梁上翼还可以作为旅客紧急疏散通道的作用。

高架轨道交通上部结构形式由传统的箱梁逐步优化为薄壁开口截面 U 梁。因可以整跨 U 梁安装, 工艺先进适用, 经济合理, 故安装速度可达到每天 1 跨[4], 是节段梁拼装施工的 3~4 倍。

## 1 工程概况

该高架区间段上部结构采用单线单槽薄壁结构简支小 U 梁结构设计方案, 梁高 1.8 m, 标准梁宽 5.224 m, 车站段梁宽 4.713 m。共有 211 跨 U 梁采用现场预制现浇。U 型梁标准跨长度 30 m, 重量 150 t。非标准跨长度 16~29 m 不等, 跨径大于 30 m 的仍使用 30 m 标准梁, 梁端设置拓展盖梁 (如图 1 所示)。

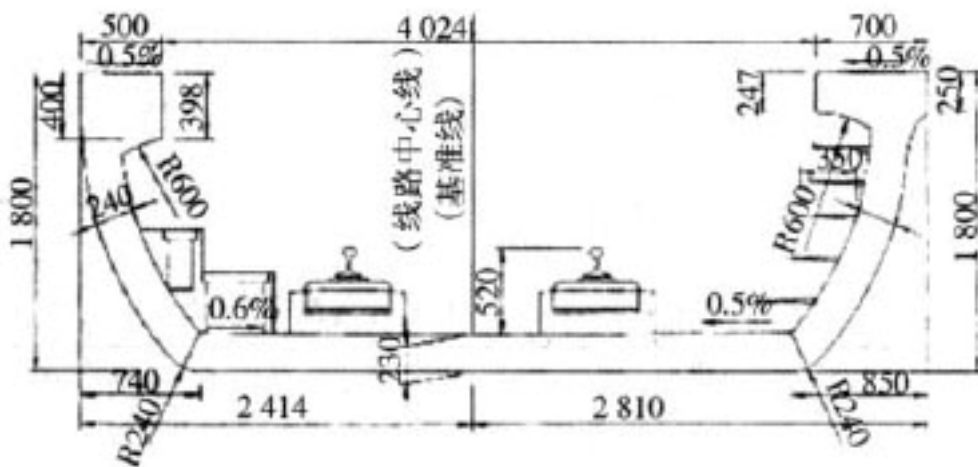


图 1 标准段 U 梁横断面

## 2 U 梁设计要点

### 2.1 结构形式及材质选择

U 梁设计采用直线后张法预应力混凝土简支梁, 腹板、底板厚 240 mm, 上翼板厚 250 mm, 上翼板宽 500 mm (内侧)、700 mm (外侧), 桥面上口宽 5.224 m, 底板宽 3.634 m, 全桥不设横梁和横隔板。材料采用 C55 混凝土, 纵向预应力钢束均为直线束, 选用  $\Phi 15@20$  高强度低松弛预应力钢绞线 (GB/T 5224-2003 技术标准), 标准强度  $f_{pk}=1860$  MPa, 弹性模量  $E_p=1.95 \times 10^5$  MPa。两端张拉, 张拉锚下控制应力  $\sigma_{con}=1300$  MPa, 锚具符合《预应力筋用锚具夹具和连接器标准》(GB/T 14370-2000)。波纹管采用塑料波纹管。

### 2.2 U 梁加载实验



对原型 U 梁加载试验分析验证：（条件 I）在设计荷载作用下，检测桥梁结构的强度、刚度和抗裂性；（条件 II）在开裂荷载作用下，检测桥梁结构的强度、刚度和抗裂性；（条件 III）在 2 倍和 2.5 倍设计荷载作用下，检测桥梁结构的强度、刚度。通过对试验结果进行分析，按有关桥梁规范来评价桥梁结构的强度、刚度、抗裂性和承载能力等指标是否满足规范设计要求。

### 2.2.1 数据分析

U 梁加载实验数据见表 1 所示。

表 1 U 梁加载实验数据表

序号	加载工况条件	加载分级	正截面压应力 /MPa	正截面拉应力 /MPa	梁底横向拉应力 /MPa	跨中挠度 /mm	备注	
			(-)	(+)	(+)			
1	二期恒载					3.89	"1"为正	
2	正常使用阶段活载(跨中)	条件 I 4 级	16.6	0	2.3	12.32	冲击系数 1.18	
3	正常使用阶段活载(支座)	4 级	16.2	0	4.6	8.69		
4	开裂荷载阶段活载(支座)	5 级	18.2	2.8	3.8	13.43		
5	开裂荷载阶段活载(跨中)	条件 II 10 级	应力变化呈线性-非线性		——	开裂,开裂系数 1.3	30.94	第 10 级荷载时发生开裂
6	破坏荷载阶段活载	条件 III 6 级	非线性		——	——	47.56	第 6 级荷载时上混凝土压应变大根限压应变

表 2 U 梁加载后的试验梁刚度评价表

序号	状况	横向频率 /Hz	竖向频率 /Hz
1	加载试验前	3	4.13
2	加载试验后	2.91	4.05
3	试验后无橡胶支座	5.03	4.25



### 2.2.2 结果评价

据文献[5]所述试验梁破坏呈典型的受弯构件延性破坏，安全系数 $>2.5$ ，纵向抗裂性安全系数 1.3，该梁模拟运营荷载下混凝土应力满足规范要求。试验梁静活载下，挠跨比  $1/2\ 750 < 1/2\ 000$ 。梁底板横向无预应力体系，开裂较早，裂缝宽度满足规范要求。梁横向频率可达 5.0 Hz 以上 $>L/30$ 。

U 梁加载后的实验梁刚度评价见表 2 所示。

### 2.3 抗弯分析

U 梁抗弯计算的关键问题和特点是计算模型的选定，然后是局部应力的处理。一般通过 ROBOT，ANSYS 有限元程序分析，验证 U 梁的行车道板全宽作为梁的下翼缘参与全截面抗弯。通过分析，U 梁的下翼缘板大幅降低截面重心和下翼缘拉应力水平，故可节省抵消拉应力所需的预应力筋，加大上翼缘压应力水平而充分发挥混凝土的受压性能，截面更加合理。

### 2.4 抗扭分析

在平曲线上 U 梁受到风载、离心力、偏心力车垂直荷载、超高影响力、脱轨列车对上翼缘的水平冲击力等都将引起扭转。对于 U 梁开口截面在约束扭转分析中，截面将有因翘曲受阻而产生的正应力，此正应力沿截面高度分布不均引起杆件弯曲并伴随弯曲剪应力流，此剪应力流在截面形成二次扭矩。故有：约束扭转中的剪应力=自由扭转剪应力+弯曲剪应力（二次剪应力）；杆件截面扭矩=自由扭转扭矩+二次扭矩。



## 2.5 二维温度模型浅析

U梁属于简支结构，纵向可以自由变形，整体升降温对结构受力影响不大。但局部升温对结构的影响较大[6]（如图2所示）。腹板内侧和外侧均能接受光照，选取一个温度梯度。底板上侧可以接受光照而下侧不能，所以选取两个温度梯度。

## 3 U梁施工要点

### 3.1 梁体混凝土技术指标

鉴于U梁的特殊结构，首先在配合比设计中要考虑到100a的耐久性要求。为改善混凝土和易性，提高混凝土性能，降低水泥用量，经过多次配合比试验，选用高效减水剂聚羧酸为外加剂，使得1d，2d，7d强度分别达到18MPa，24MPa，55MPa[7]。预应力张拉时梁体混凝土强度达到100%设计强度，弹性模量指标达到80%规范（TB10002.3-2005）指标[8]。

### 3.2 预制模具体系设计

预制模具体系由门架、内模、外模、端模和底模组成。模具拆装采用了外模横向移动脱模、内模转动脱模，然后模具整体纵向移动至下一生产台座，尽量不占用龙门吊（如图3所示）。

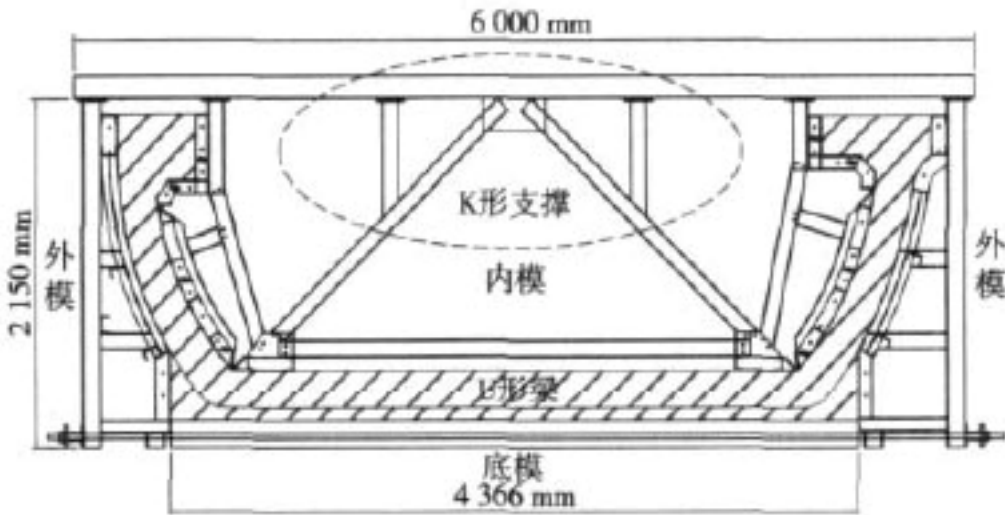


图3 模具安装示意图

### 3.3 混凝土浇筑质量控制

钢筋及预埋件隐蔽工程验收后，对模板及支撑系统预检，合格后浇筑混凝土。混凝土浇筑从梁体两端开始，沿梁长向中间汇集，先底板后腹板，水平分层对称浇筑（如图4所示）。为了避免因浇筑腹板时底板承受过大压力而膨胀，底板混凝土接近初凝但尚未初凝时开始腹板浇筑，使其衔接良好，按图4浇筑成型顺序依次浇注至U梁上翼缘。

### 3.4 预应力体系的建立

有效预应力体系的建立对构件的抗裂性能有显著作用，主要为预应力张拉、压浆及封锚。U梁为后张法预应力混凝土梁，预应力筋的张拉顺序为：（1）当混凝土达到50%设计强度，张拉第一批4根钢束，张拉控制应力为700MPa；（2）混凝土强度达到100%设计强度，弹性模量达到80%设计值，二次张拉全部钢束依次对称张拉至1300MPa。



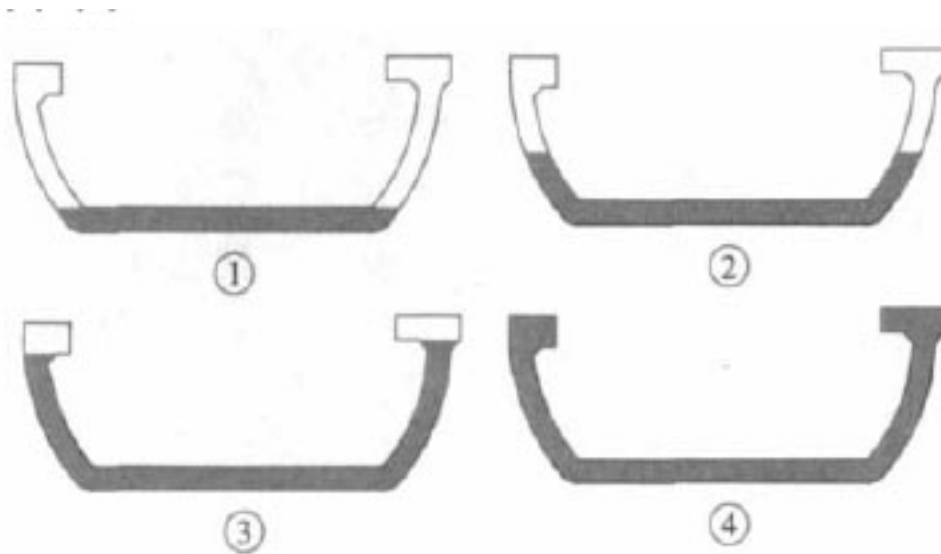


图 4 混凝土布料工序图

在张拉后 48 h 内进行压浆，在压浆前，必须试抽真空，真空泵抽成的真空度控制在 $-0.09\sim-0.1$  MPa。当真空度达到并维持在 $-0.08$  MPa 左右时，启动真空泵，使灌浆压力达到  $0.5\sim 0.7$  MPa，出浆与入浆颜色一致后，关闭出浆阀门，对浆体施加正压，将浆体内游离状态的水尽量多压出，且从排气孔排出的水泥浆无气泡，无微沫浆，其颜色与入浆的颜色相同，压浆泵压力达到  $0.7$  MPa 左右，持压  $1\sim 2$  min，关闭灌浆泵。

封锚混凝土采用补偿收缩混凝土，符合设计要求，与梁体混凝土同种强度、无色差。

### 3.5 U 梁的运输

U 梁采用开口薄壁截面，横向抗扭刚度小，因此运输、安装过程中必须保证 U 梁四个支承点高度一致、受力均匀，以防止 U 梁破坏。

根据 U 梁重量、外形尺寸和运输道路环境，选用梅赛德斯——奔驰 3354，前四轴线和后五轴线全液压平板车。前、后液压平板车上各增设一个转盘机构且上置  $5\ 240\ \text{mm}\times 900\ \text{mm}\times 30\ \text{mm}$  的两块翼板和  $5\ 240\ \text{mm}\times 900\ \text{mm}\times 16\ \text{mm}$  三块腹板组合的承重横梁，材料选用  $30\ \text{mm}$  和  $16\ \text{mm}$  的  $16\ \text{Mn}$  钢板。前四轴液压板转盘机构只带纵向倾角，后五轴线液压板转盘机构不带纵向倾角，两液压平板转盘机构均可  $360^\circ$  旋转。直线行驶速度在  $5\ \text{km/h}$  以下，转向行驶速度在  $3\ \text{km/h}$  内。

### 3.6 U 梁的吊装施工要点

根据施工现场实际条件，梁体吊装分三个专项方案，分别为：预制梁场内区段、一般区段和跨河区段 U 梁吊装。预制梁场内区段采用场内龙门吊，一般区段采用  $200\ \text{t}$  双机抬吊，跨河区段采用  $750\ \text{t}$  大型单机起吊。

#### 3.6.1 专用吊具设计

(1) 龙门吊或双机抬吊，制作小平衡梁专用吊具（如图 5 所示）。小平衡梁采用双拼  $28\ \text{a}$  槽钢加工，为适应标准段和车站段两种梁宽，分别加工  $3.6\ \text{m}$  和  $3.1\ \text{m}$  两种长度。小平衡梁上部沿  $60^\circ$  方向设置两个吊耳。



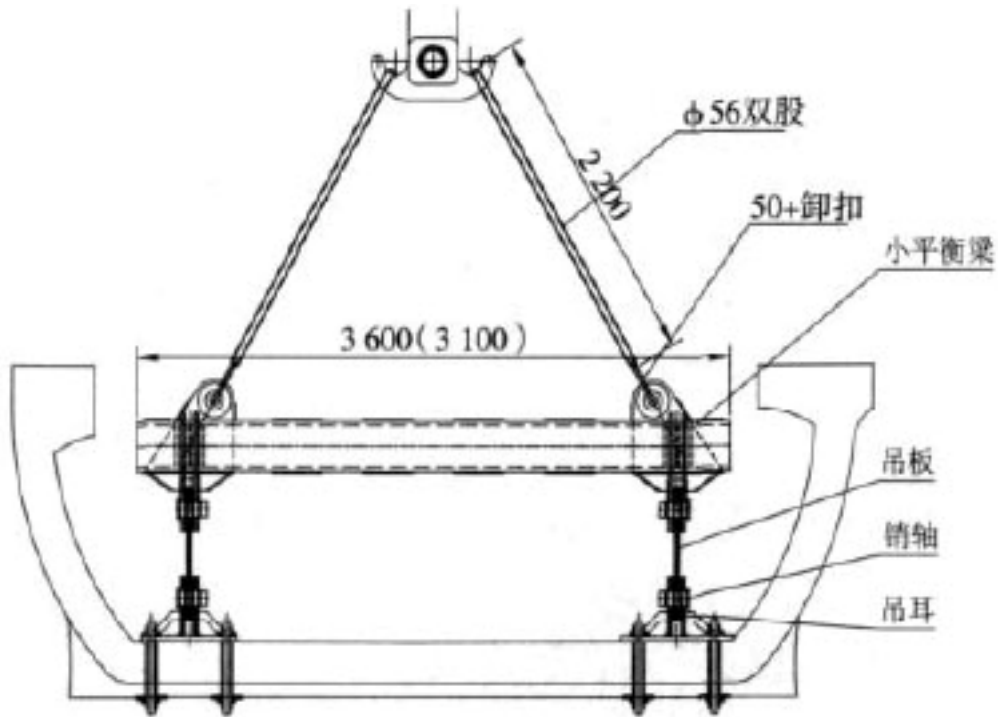


图5 小平平衡梁辅助起吊模式图

(2) 大型单机起吊，制作大、小平平衡梁专用吊具（如图6所示）。大平衡梁长30 m，宽1.4 m，高1.4 m，长度可以根据U型梁的长度进行调整，最小调整长度为3 m。在大平衡梁中点安置一根调节钢丝绳，起吊时有一个向上的拉力以防下挠产生。主平衡梁上部吊装时，钢丝绳与水平线的角度不得小于60°。

### 3.6.2 就位及调整

(1) 就位步骤。U梁在吊起腾空300 mm后→旋转一定的角度→在运梁车上进行盆式支座的安装→吊装到指定位置上空→吊机缓缓松钩→由4台50 t液压千斤顶受力→U梁调整标高、里程、轴线→调整后用临时支座固定（配好垫板和斜垫铁高度）→复核安装尺寸→合格后4台50 t液压千斤顶同步卸载→撤离千斤顶→支座灌浆位置搭设模板→灌浆→达到规定强度后模板拆除→拆除斜垫铁→撤离临时支座→安装盆式支座围板。

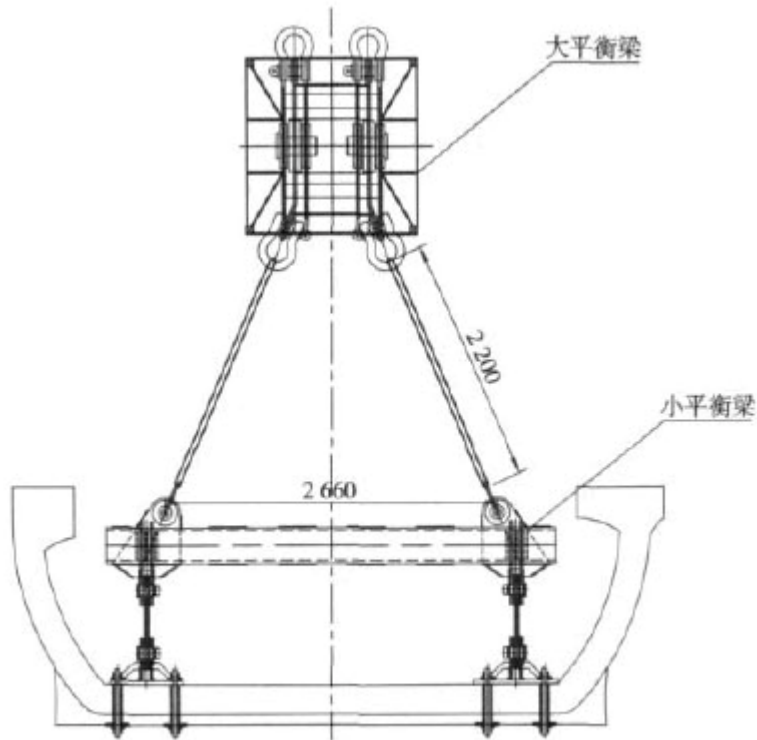


图6 大、小平平衡梁辅助起吊模式图

(2) 调整。U 梁吊装到预定位置后, 首先用于支座内侧的扁平千斤顶支承, 并调整标高。然后视需要安装水平调整千斤顶, 进行轴线和里程调整。在每块钢板上设置两个反力架, 若 U 型梁需要进行轴线和里程调整, 则在反力架上安装轴线和里程调整千斤顶, 通过顶进、扁平千斤顶来完成调整。调整完成后, 安装临时支座。

(3) 盆式支座精确就位。待临时支座安装完成后用环氧砂浆灌注螺栓预留孔及支座底面垫层。环氧砂浆硬化后再旋紧地脚螺栓。拆除临时支座, 使 U 梁荷载转移到盆式支座上。

## 5 结语

(1) 通过实验研究, 试验梁破坏呈典型的受弯构件延性破坏, 安全系数 $>2.5$ , 纵向抗裂性安全系数 1.3。梁模拟运营荷载下混凝土应力满足规范要求, 桥梁刚度满足规范要求。

(2) U 梁抗剪强度设计目前通常采用试验室中建立的半经验公式, 设计配筋除按我国铁路规范进行抗剪配筋计算外, 还应采用国外标准进行比较验算。U 梁的二维温度模型, 为今后的设计工作提供重要参考。

(3) 后张法预应力混凝土 U 梁, 因薄壁自重较轻、底板较薄, 外形美观并可以减噪, 造价节省。U 梁的应用取得了良好的经济效益和社会效益, 形成了一套完整的 U 梁预制、安装的科学施工工艺, 在今后城市高架轨道交通建设中有极大的推广潜力。

## 参考文献

- [1] 贺恩怀. 槽形梁在城市轨道交通工程中的应用形式[J]. 城市轨道交通研究, 2003, (3): 68-75.
- [2] 刘彦明. 上海轨道交通 6 号线槽形梁设计[J]. 科技交流, 2004, (1): 89-106.
- [3] 郭敏. 广州市地铁高架 U 型梁结构设计[J]. 广东土木与建筑, 2004, (5): 12-14.
- [4] 蔡鹏. 城市高架交通新型“U”形梁的预制技术[J]. 建设施工, 2008, 30(1): 61-64.
- [5] 李文勇. U 形梁结构加载模拟实验的分析和研究[J]. 中国市政工程, 2008, (3): 90-92.
- [6] 吴迅, 张鹏. 轨道交通 U 形梁温度模式研究[J]. 山西建筑, 2008, (11): 28-29.
- [7] 黄超, 姚红英. U 形梁关键施工技术研究[J]. 上海建设科技, 2008, (4): 37-40.
- [8] JT B10002.3-2005 铁路桥涵钢筋混凝土和预应力钢筋混凝土结构设计规范[S].



