

# 富水软土地质箱涵连续顶进精度控制研究

陈晓东

中铁二十四局集团有限公司

**摘要:** 为保证富水、软土地质多孔箱涵连续顶进就位精度,文章以白马泾路下穿京沪铁路工程为研究对象,针对地下水位高、基底承载力弱、多孔箱涵连续顶进多因素条件下箱涵顶进精度控制的关键技术进行研究。研究表明:采用深度可隔断渗流系数较大土层的止水桩对顶进范围路基分区设置封闭止水圈,可实现高水位路基分区分阶段降水及沉降控制;通过滑板预设一定上坡、箱涵前端设置船头坡、顶进挖土预留沉降余量,可有效降低软土顶进“栽头”风险;通过设置切土翅膀,翅膀前端设置一定外扩,箱身两侧设导向墩,箱身预制位置预留轴向偏斜余量,可有效保证切土顶进安全及轴向精度控制;将传统箱涵顶进液压力系统通过PLC电控化改造,可实现多项同步联动、顶力均匀分布及纠偏精准控制;利用箱身姿态自动监测系统,可实时、精确掌握箱涵顶进过程姿态,为纠偏提供依据。

**关键词:** 富水;软土;箱涵顶进;精度控制

【DOI】 10.12254/j.issn.2096-6539.2022.18.045

## 一、引言

近年来,随着我国道路建设步伐的加快,出现了许多铁路与公路的平交路口,为了缓解交通压力,提高通行的安全性,下穿铁路箱涵成为解决这一问题的常见方法,该方法具有造价低,施工速度快,不中断交通,对既有铁路行车干扰小的特点<sup>[6-7]</sup>。经过数十年发展,我国大量工程实践和试验研究为箱涵顶进施工工艺的不断改进和完善积累经验。王涛<sup>[1]</sup>、张楠<sup>[2]</sup>、姜九寅<sup>[3]</sup>、赵立<sup>[4]</sup>对高水位、软土地区工作坑降水方案设计进行了系统阐述;方浩<sup>[5]</sup>、王飞球<sup>[6]</sup>、杨青青<sup>[8]</sup>分别通过有限元软件分析了软土顶进降水对铁路路基的影响、顶进过程框架及土体的受力规律;康军利<sup>[9]</sup>、付琪生<sup>[10]</sup>对箱涵顶进底板内力及摩阻力进行了研究;王飞球<sup>[7]</sup>、杨彦军<sup>[12]</sup>通过箱身预埋应变计对箱涵顶进姿态进行监测;邹春棋<sup>[11]</sup>、李虎<sup>[14]</sup>对顶力智能控制及箱涵姿态预测进行了尝试。得益于这些研究,箱涵顶进施工工艺已日趋成熟,但由于受顶进周边环境、土质及箱涵类型的影响,箱涵顶进过程可能出现“栽头”、轴向偏斜及线路沉降等问题,特别是在富水、软土地质进行多孔箱涵连续顶进的精度控制,应结合现场特点,制定系统的实施方案。

本文以白马泾路下穿京沪铁路工程为研究背景,对涉及顶进精度控制的路基降水、轴向及高程控制、顶力控制、箱涵姿态测量等关键技术及创新应用进行系统阐述,为今后类似工程提供参考。

## 二、工程概况

本研究依托昆山市白马泾路下穿京沪铁路工程,设计采用5孔分离式框架涵下穿京沪铁路,两侧与现浇U槽顺接,全长560m。箱涵与铁路相交中心里程K1401+276.5,法线交角3°,桥址处京沪铁路线间距

4.10m,一半为直线段,一半为缓和曲段,曲线半径R=1210m,缓和曲线长150m,桥上线路为0.25%上坡。

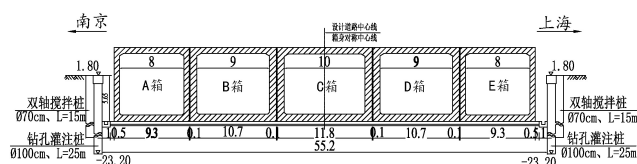


图1 铁路箱身总体立面图(单位:m)

新建5孔(8m+9m+10m+9m+8m)铁路箱身沿南京方向依次标号为A、B、C、D、E,箱身高度8.9m,长度24.20m(5m开口箱+19.2m箱涵),最大箱身宽度11.8m,箱涵最大自重1871.8t,顶程36.10m。

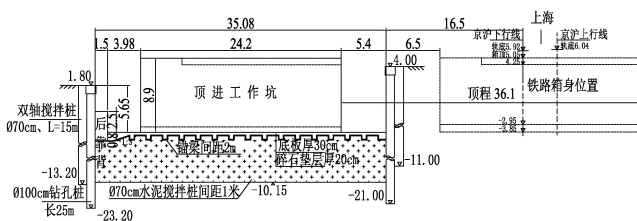


图2 铁路箱身总体立面图(单位:m)

工作坑位于铁路北侧,尺寸55m×35m,最大开挖深度8.35m,底板兼作顶进滑板,单侧顶进工艺,依次顺序顶进,慢行时长6个月。受限于线间距,线路加固采用D16m便梁,其中箱涵A顶进时架设3组便梁(一拖二),箱涵B、C、D、E顶进时架设2组便梁(一拖一)。

桥址处基底位于粉土层、淤泥质粉土层,基本承载力 $\sigma = 60\text{kpa}$ 。淤泥质粉土层透水性和富水性好,为潜水;粉土层透水性和富水性好,为微承压水。地下水位埋深0.65~4.92m,标高0.12~2.85m,地下水位变幅受季节影响。

## 三、技术难点

### (一) 止、降水

(1) 顶进范围地下水位高,底板最大水位埋深6.7m,且正值汛期,降水难度大。

(2) 基底土层透水性好,渗流系数大,降水过程易引起路基沉降,影响铁路行车安全。

### (二) 顶进精度控制

(1) 顶进箱涵基底承载力较弱,设计为平坡顶进,顶进过程极易发生箱涵“栽头”。

(2) 箱涵孔数较多,相邻间距10cm,多孔箱涵连续顶进轴线精度控制要求高。

## 四、关键技术

### (一) 止水、降水

既有文献对工作坑降水研究较多,方案较成熟,但

对于路基降水研究较少。根据本工程特点，工作坑、路基降水分阶段进行：先工作坑降水，待箱涵预制完成顶进前再进行路基降水。

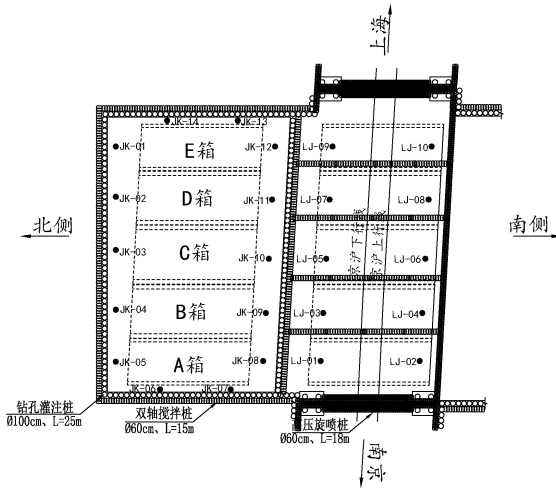


图3 止水、降水平面布置图

(1) 降水先止水，降水前采用止水桩形成止水圈，桩长以隔断渗流量大的土层为宜。根据地质报告及开挖深度，工作坑止水采用L=15m、 $\varnothing$ 0.7m双轴搅拌桩，桩底深入渗流量较小的粉质黏土层。采用L=12m、 $\varnothing$ 0.35m大口井沿工作坑形成闭合降水区域，共设井点14孔（JK-01~JK-14）。

(2) 路基降水难点在于止水圈的形成，由于5孔箱涵跨度大，顶进周期长，为降低前孔箱涵降水对后顶箱涵路基沉降的影响，每孔箱涵单独设置止水圈，分区降水，共设5个分区。铁路北侧利用既有L=15m、 $\varnothing$ 0.7m双轴搅拌桩，铁路南侧搅拌桩采用相同参数。垂直铁路方向采用条基底部L=18m、 $\varnothing$ 0.6m高压旋喷桩止水，四角交叉位置采用高压旋喷咬合搭接0.3m。降水结合顶进顺序分阶段设计，单孔箱涵设置大口井2孔，分别位于铁路南、北侧，共计10孔（LJ-01~LJ-10）。每孔箱涵顶进前启动相应井点将地下水位稳定降至基底1.0m。

(3) 工作坑、路基降水期间同时进行路基沉降观测，确保线路行车安全。

### (二) 滑板制作

软土地质箱涵顶进“栽头”多在箱身一半出滑板后发生。由于滑板、基底土体承载力不同，箱身重心出滑板后前端必然出现一定的沉降。关键在于控制前端的趋势，下行趋势一旦形成，将很难进行调整。因此，可通过滑板坡度的调节，设置一定的预沉降量，消除箱身因重心出滑板后的土体沉降而可能形成的下行趋势风险。

本工程设计为平坡顶进，滑板制作时设置5%的上坡，确保箱身重心出滑板后保持一定的上坡趋势，后续顶进过程结合前端挖土进行调节，确保箱身顶进高程精度。

### (三) 导向墩

导向墩的设置是顶进箱身未出滑板前轴向控制的有效辅助措施。导向墩沿箱身两侧布置，间距5m，在滑板

施工时预埋基础，顶进前焊接墩体。导向墩与箱身间预留10cm，顶进过程加塞垫木，有效限制箱身出滑板前的轴向偏斜。

### (四) 箱涵预制、船头坡设置

多孔箱涵顶进中首孔精确就位是关键，而箱身预制位置准确是第一步。为确保首孔箱涵轴向精度，A箱身预制位置相对B箱涵向南京方向增加5cm，预留轴线偏斜余量，后续通过顶力进行轴向调节，确保首孔箱涵就位精度，B、C、D、E箱涵按原有设计位置预制。

预制箱身底板前端设置长度1.5m、高度0.1m船头坡，通过顶进过程提前挤压基底土体，有效防止箱涵顶进“栽头”。

### (五) 顶进切土翅膀

箱涵顶进范围线路为高路堤，地质为淤泥质软土，为确保切土顶进，箱身前端设置钢筋混凝土翅膀。结合顶进工况，A箱涵设置双侧翅膀，B、C、D、E箱涵设置单侧翅膀。

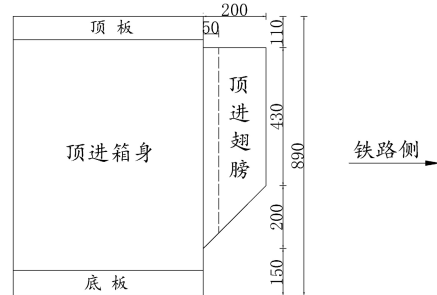


图4 顶进切土翅膀（单位：cm）

研究发现，箱涵侧壁土压力对箱涵顶进所造成的阻力不可忽视<sup>[7]</sup>，容易因侧向土压力不平衡导致轴向偏斜。为降低侧向土压力的影响，翅膀前端外扩5cm，通过侧向超切土体，使侧壁与土体之间形成一定的间隙，减小侧向土压力，提高轴向控制精度。

切土翅膀顶部结合线路拉槽深度确定，防止出现空切现象，翅膀底部预留前端挖土位置。

### (六) 顶进挖土

顶进挖土分两阶段进行。

顶进前先进行线路拉槽，深度不超过条基底部，按1:1放坡，避免超挖导致条基底部塌空，保证条基及线路稳定。

顶进时采用边挖土边顶进的方式，单次挖土进尺为一个顶程，严禁超挖，利用翅膀保持切土顶进。由于基底土体压缩模量较大，前端挖土时预留底板上1m厚原状土，结合箱身船头坡，避免箱涵顶进栽头。

### (七) 箱涵顶进智能液压控制系统

传统箱涵顶进系统包括控制阀组、液压千斤顶2组独立模块。控制阀为手动控制，单套阀组仅能控制10台液压千斤顶，单项最大顶力200t，遇超大吨位箱涵顶进时需采用多组控制阀组，多人操作，顶力无法同步。

本项目通过PLC电控化改造将手动控制改为电磁按钮控制，同时实现单动和联动模式选择，使得操作者

可实现按钮控制每个液压千斤顶的工作状态。单动模式下，操作者可以通过操作单个按钮，精准实现所需千斤顶控制，实现箱涵姿态精准纠偏；联动模式下，操作者可实现多项联动，顶力同步，保持箱涵既有姿态平稳顶进。

### （八）顶进姿态测量

本工程创新采用一种箱涵顶进姿态自动测量方法，通过全自动全站仪+测量棱镜实时、快速采集箱涵姿态数据。

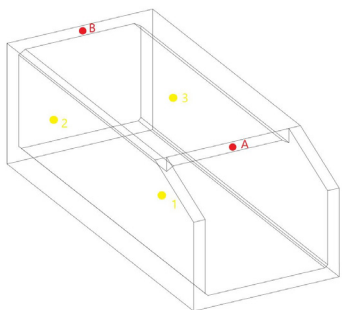


图5 测量系统点位布置图

图5中：1#、2#、3#为箱身顶进姿态测量点位，共计3个，分别布置于箱身两侧侧墙内，A、B为箱身顶板轴线中点，通过测得A、B的三维坐标，就能唯一确定箱涵的姿态。

系统建立前，先测定可测点位（1#、2#、3#）与A、B点的关系。箱涵顶进后，通过自动采集可测点的坐标数据后传输至计算机，计算出A、B点的坐标，从而确定箱涵的姿态。

通过计算箱涵顶进姿态，与理论数据进行比较（高程、轴线），实时显示箱涵姿态，为顶进过程纠偏提供可靠依据。

全部5孔箱涵顶进就位，最大中线偏移量19mm，为第一孔箱涵顶进翅膀切土进入线路正下方时发生；最大高程偏移量-17mm。实现了软土地质多孔箱涵顶进就位高精度控制的既定目标，取得了较好的实践效果。

### 五、结束语

本文以白马路下穿京沪铁路工程为背景，通过对富水、软土地质路基分阶段分区降水、顶进轴线、高程精准控制的成功实践，给类似工况的箱涵顶进提供一定的思路：

（1）富水（潜水、微承压水）、软土地质铁路箱涵顶进范围路基在已经形成封闭止水圈的情况下可采取井点分区降水。降水宜结合顶进顺序分阶段进行，顶进时地下水位稳定控制在底板下1m，降水同时加强路基沉降观测。

（2）软土地质平坡顶进可通过滑板预设一定的上坡、箱涵前端设置船头坡，并在顶进过程结合挖土预留箱涵沉降余量，降低箱涵“栽头”风险。

（3）通过设置切土翅膀，切土顶进，可有效保证顶进过程线路安全。通过翅膀前端外扩超切土体，可有效减少箱身侧向土压力，并结合导向墩，提高顶进轴线

控制精度。

多孔箱涵翅膀结合顶进顺序在切土侧设置翅膀，翅膀顶部高程结合线路拉槽深度确定。

（4）传统箱涵顶进液压力系统通过PLC电控化改造，实现多项同步联动，顶力均匀分布，可以很好的解决因顶力不同步造成的箱涵受力不均、顶进方向偏斜问题，实现顶力精准控制及精确纠偏。

（5）采用箱涵顶进姿态自动测量系统，可实时、精确地计算出顶进箱涵高程、轴线偏差，为箱涵顶进过程姿态控制、纠偏提供精确依据。

### 参考文献

- [1]王涛. 高水位软土地区顶进式铁路框架桥设计[J]. 铁道建筑技术, 2015(02): 27-29.
- [2]张楠, 胡鹏辉. 紧邻既有铁路线深基坑的降水设计与沉降监测[J]. 铁道工程学报, 2010, 27(09): 1-4.
- [3]姜九寅. 既有线顶进桥涵施工中降水方案的设计[J]. 铁道建筑, 2004(07): 6-8.
- [4]赵立. 临近既有线框构桥工作坑开挖防护及降水方案设计[J]. 铁道建筑技术, 2014(S1): 70-72+76.
- [5]方浩, 方磊, 童立元. 软土地区基坑开挖降水对运营高速铁路基的影响分析[J]. 建筑技术, 2017, 48(09): 968-971.
- [6]王飞球. 下穿式箱涵顶进施工过程中土体受力规律研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2018, 38(04): 738-744.
- [7]王飞球. 长大型箱涵下穿芜铜铁路线施工全过程监测研究[J]. 现代交通技术, 2016, 13(01): 51-56.
- [8]杨青青, 魏琪. 软土地区多孔框架涵顶进结构力学特性研究[J]. 城市道桥与防洪, 2021(06): 347-348+359+34.
- [9]康军利. 大跨度多孔箱涵顶进过程基底摩阻力研究[J]. 铁道建筑技术, 2021(04): 83-86.
- [10]付琪生. 大跨度多孔箱涵顶进时底板内力研究[J]. 工程建设与设计, 2021(04): 92-94.
- [11]邹春棋, 郝朝东, 邓帅. 大跨度箱涵下穿铁路的顶力智能控制研究[J]. 铁道建筑技术, 2019(10): 82-87.
- [12]杨彦军, 魏俊领. 机场滑行道箱涵顶进施工过程监控测量技术[J]. 铁道建筑, 2008(12): 37-39.
- [13]陈长青. 高水位粉砂土地质条件下多孔框架桥下穿多股铁路的顶进施工技术[J]. 工程建设与设计, 2013(05): 168-171.
- [14]李广慧. 相邻两座小净距大跨度多孔框架涵下穿铁路顶进施工技术[J]. 铁道建筑技术, 2016(04): 32-34+57.
- [15]李虎. 大跨度箱涵顶进姿态智能预测技术研究[J]. 四川水泥, 2020(04): 124-125.

基金项目：中铁二十四局路桥分公司科技研发项目（2021-02）

作者简介：陈晓东，性别男，安徽蚌埠人，工程师，本科，主要从事桥梁施工技术研究和管理工作。