

# 基于三维有限元模型的定向钻穿越鄂北管线安全影响分析研究

司培育<sup>1</sup> 李文中<sup>2</sup>

1.华北水利水电大学 河南 郑州 450046

2.鄂北地区水资源配置工程建设与管理局(筹) 湖北 武汉 430062

**【摘要】**：魏荆线老旧管道整治工程与鄂北工程孟楼~七方倒虹吸埋管段 PCCP 相交，魏荆线老旧管道整治工程施工期间，鄂北工程已进入通水试运行阶段，为避免工程建设给鄂北工程通水运行带来的不利影响和安全风险，确保鄂北工程运行安全和魏荆工程施工安全，开展基于三维有限元模型的交叉段施工安全影响分析研究。根据模拟结果提出有效的风险控制和监测建议。

**【关键词】**：魏荆线老旧管道整治工程；鄂北工程；交叉工程；有限元模型；安全影响

DOI:10.12417/2811-0528.26.07.087

## 1 交叉段工程简介

### 1.1 鄂北地区水资源配置工程

交叉段位于鄂北地区水资源配置工程(以下简称“鄂北工程”)位于孟楼~七方倒虹吸埋管段,襄州区夹河套内夹河套检修连通分水系统上游 556 米处。该处输水管段为 3 根沟埋 DN3800mm 预应力钢筒混凝土管(简称 PCCP 管)并排铺设,管道设计工作压力为 0.4~0.8MPa,埋管段管道中心距为 6.1m。该处地面高程 77.8m,鄂北工程管道设计中心线高程为 72.65m,管底高程为 70.36m,工作压力为 0.6MPa,管顶覆土厚度 2.85m。交叉作业期间,鄂北工程主体工程已完工,正在试运行。

### 1.2 魏荆线老旧管道整治工程

交叉工程为魏荆线老旧管道整治工程(以下简称“魏荆工程”)拟新建的魏岗-荆门原油管道 1 条。其湖北襄阳段在襄州区段 AA018(里程:10km+045.5m)~AA019(里程:10km+683.2m)与鄂北工程管线交叉,交叉角度为 80°。穿越段长度为 400m,管道实长 401.76m。穿越主管规格为 Φ219.1×7.9mmL415Q 无缝钢管,管道采用 3LPE 防腐层,外加硬质聚氨酯泡沫塑料保温,保温层外设高密度聚乙烯塑料保护层,最外层加玻璃钢防护层。

原油管道顺油流方向右侧 10m 处,平行于输油管道轴线,布设一条与输油管道配套的光缆。工程穿越相对位置见图 1。

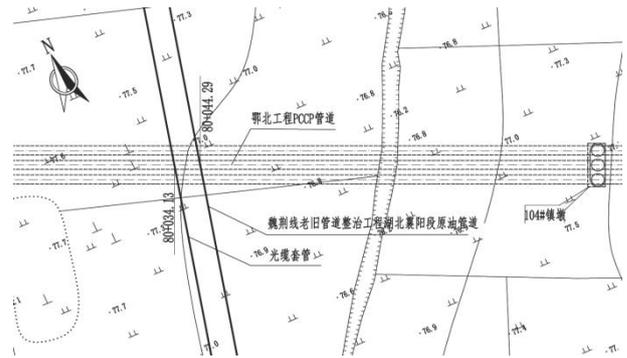


图1 魏荆线老旧管道整治工程穿越鄂北工程相对位置图

### 1.3 工程交叉部位定向穿越施工方案

交叉段原油管道采用定向钻方式穿越鄂北工程输水管道,与鄂北调水管线交叉角度 80°,定向钻入土点距离鄂北调水管线 80.61m,入土角为 10°,出土角为 8°,曲率半径 1500D(D 为穿越管段钢管外径)。定向钻在鄂北工程管道交叉点处管道高程为 64.66~65.4m,鄂北工程管道底部高程为 70.35m,详见图 2。

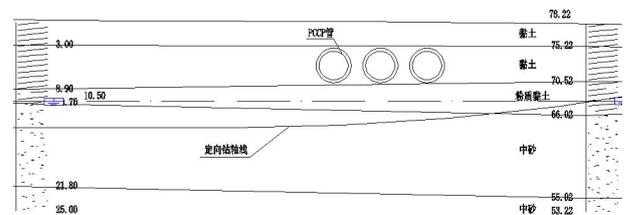


图2 鄂北工程管道底部高程图

与输油管道配套的光缆套管单独进行定向钻穿越,套管采用 D114×6.0mm 焊接钢管,穿越曲线与输油管道定向钻穿越曲线设计要求相同。由于输油管道和光缆套管施工工艺相同,光缆套管孔径较小,本次着重开展输油管道定向穿越对鄂北工程安全影响分析。

## 2 工程交叉风险分析

### 2.1 地质情况

定向钻勘察穿越地层与鄂北地区水资源配置工程勘察地层均为上部粘土，下部砂层，地质条件无大的区别。鄂北工程勘察时进行了膨胀性测试，显示该段上部粘土具弱膨胀性，同时，该处地层结构显示地下水具一定承压性。

定向钻施工时考虑上部粘土具弱膨胀性的影响，膨胀性一般是该层土有蒙脱石粘土矿物的存在，使孔壁粘土层接触到泥浆中的水分时，发生粘土的吸水、膨胀、分散。因此，尽量降低泥浆的失水量以及增强孔壁粘土的抗水敏感性、抑制粘土分散、控制适当的泥浆粘度和压力尤为重要。

### 2.2 基于三维有限元模型的结构影响分析

为分析定向钻穿越鄂北工程 PCCP 管道时对管道的影响程度，本文采用有限元法对穿越段建模计算。由于石油管道孔洞较大，通信光缆套管直径较小，且通信光缆与输油管道间距 10m，在计算时不考虑通信光缆。

计算方法。采用大型通用有限元 ANSYS 软件，建立三维有限元模型，对定向钻施工过程进行模拟。定向钻扩孔完毕，回拖钢管前的孔洞采用采用“杀死”开挖单元的方法进行模拟，

详见图 3。

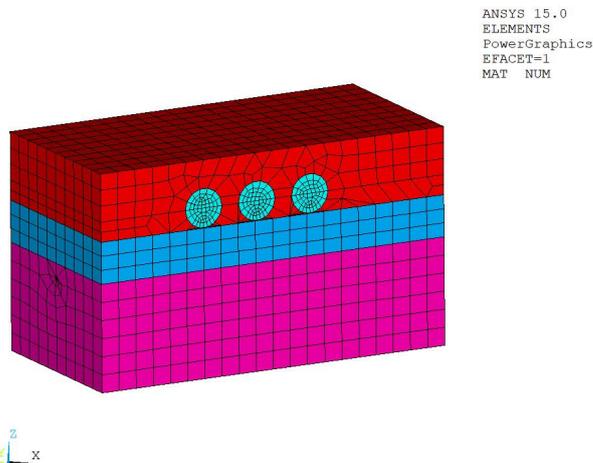


图 3 有限元模型

计算参数。定向钻穿越鄂北工程 PCCP 管段地层由上至下依次为粘土、壤土和粗砂，地层的物理力学参数采用表 1 所列数据。PCCP 管道混凝土标号为 C55，弹模为 35.5GPa，水的体积弹模为 2.2GPa。本次评估主要关注定向钻在施工过程中是否会造成 PCCP 过大沉降。管内水体与管道加权平均密度为 16t/m<sup>3</sup>。

表 1 地基各土层设计参数建议值表

地层编号	土层	试验参数				承载力特征值 fak (kPa)	基底摩擦系数 f	压缩模量 MPa	变形模量 MPa	快剪	
		孔隙比 (e)	液性指数 (IL)	含水比 (aw)	标贯击数 (N)					凝聚力 C (kPa)	内摩擦角 Φ (°)
①	上更新统粘土 (Q3jal)	0.727	0.07	0.56	11	265	0.28	6.67	6.11	49	11.7
②	上更新统壤土 (Q3jal)	0.729	0.20	0.65	9	230	0.27	5.06	4.60	26	11.3
③	中更新统粗砂、含砾粗砂 (Q2hal)	—	—	—	30~35	340~380	0.40	14.00	12.00	0	30

计算模型及边界条件。通常情况下，结构边界外 3~5 倍结构宽度受到施工的影响较小。本次计算模型以定向钻扩孔孔径 450mm 计，模型宽度较小，为方便建模和计算，模型宽度为定向钻左右侧各 10m 范围，模型长度为 PCCP 管道左右侧各 20m 范围，模型高度为定向钻管线高程以下 10m 至地面。

模型坐标系选用笛卡尔坐标系，整体直角坐标系 OXY：坐标原点选在模型的左下角，水平顺定向钻方向为 X 向，水平垂直定向钻方向为 Y 向，竖直向上方向为坐标轴 Z 轴正向。

模型的侧向水平位移约束为 0；模型底部三个方向的位移全部约束为 0；模型表面为自由面；模型中采用重力加速度 9.8m/s<sup>2</sup>，加载于坐标轴 Z 方向，自重由各自材料的质量自动计

算。

由于定向钻施工时孔洞内有泥浆护壁，一定程度上会减小 PCCP 管道的沉降，但偏安全考虑，仍以孔洞内为空作为计算边界。

计算工况。根据工程特点，定向钻扩孔后钢管回拖前孔洞达到最大孔径 450mm，为最危险工况。本次评估仅考虑该工况，在模型建立、边界条件加载后“杀死”定向钻孔洞内直径 450mm 的岩土体，模拟孔洞，岩土体在自重作用下沉降，计算得出 PCCP 管道在孔洞形成后的管底最大沉降。

计算结果及分析。经计算所得的应力及应变云图结果见图 4-图 11。

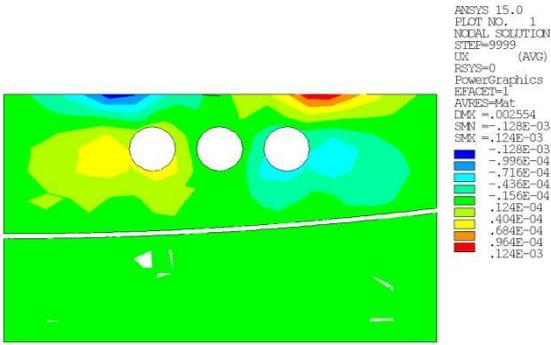


图4 顺定向钻方向水平变形云图

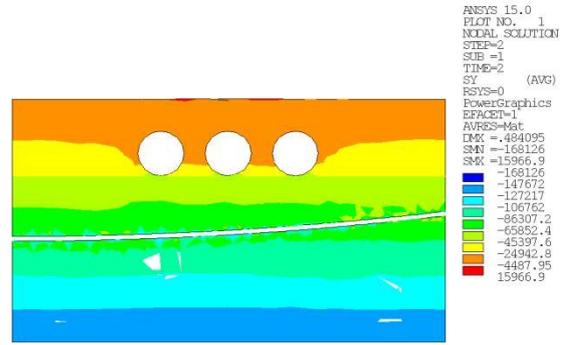


图8 垂直定向钻方向水平应力云图

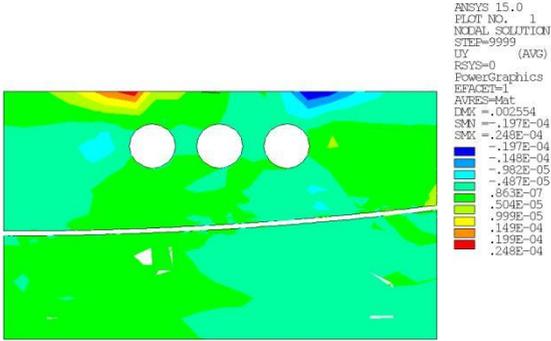


图5 垂直定向钻方向水平变形云图

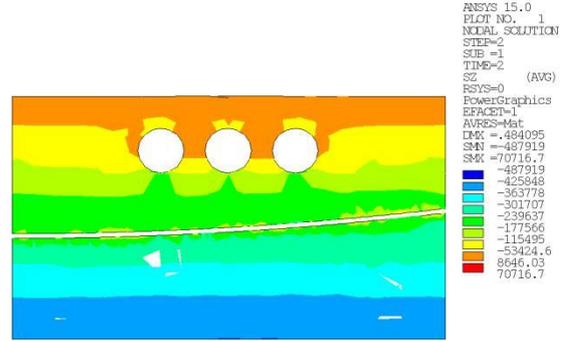


图9 铅直方向应力云图

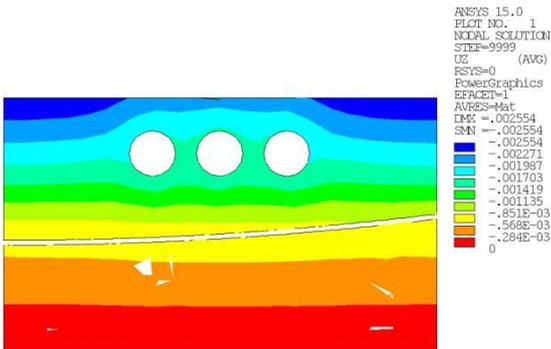


图6 铅直方向变形云图

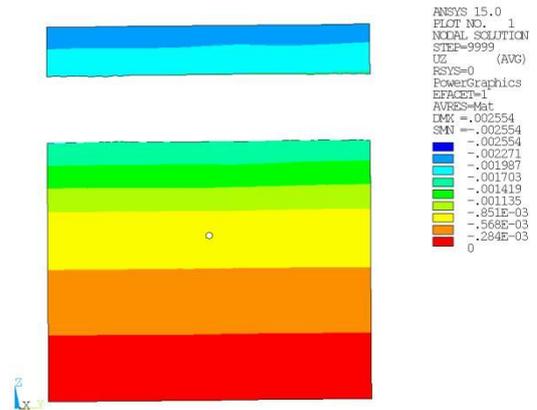


图10 顺PCCP管道铅直方向变形云图

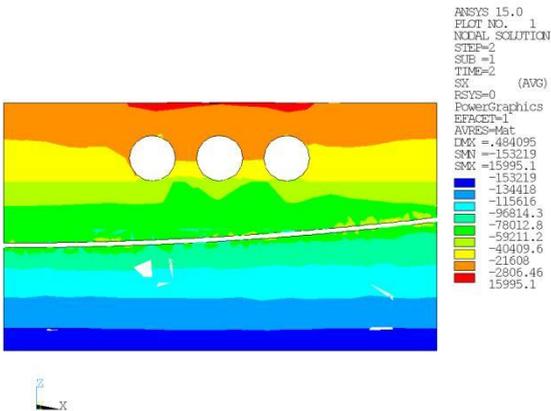


图7 顺定向钻方向水平应力云图

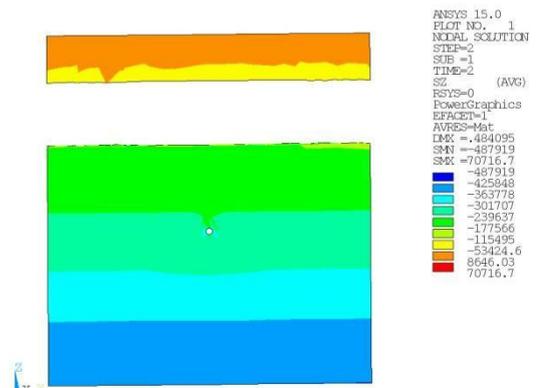


图11 顺PCCP管道铅直方向应力云图

从以上变形云图可以看出，定向钻扩孔后钢管回拖前孔洞所造成的PCCP管道底部最大沉降为2mm。

《给水排水管道工程施工及验收规范》规定,鄂北工程直径3.8m的PCCP最大允许转角为 $0.5^\circ$ ,换算成管道允许变形量约40mm。本次评估计算值远小于允许值。

### 3 风险控制及安全监测

#### 3.1 风险控制

根据三维有限元模型模拟结果,魏荆线老旧管道整治工程定向钻穿越鄂北管线造成的鄂北工程PCCP管道底部最大沉降为2mm,远小于规范允许值,定向穿越施工方法是可行的,但由于PCCP管道施工期间管道之间或多或少存在相对转角且转角度数不确定,定向钻施工造成管道沉降对管道运行安全仍有一定风险。为确保施工过程安全进行及鄂北工程在施工过程及之后的安全运行,施工方案对定向钻施工期间导向孔钻进、扩孔施工及管道回拖过程中所可能发生的问题均提出了相应的应急预案。同时,对定向钻施工完成后管道与孔洞之间的空隙进行充填灌浆,以减少定向钻孔洞变形,减小PCCP管道的永久沉降。

为及时掌握定向钻施工导致的PCCP管道的沉降情况,采取施工过程及之后一段时间的安全监测措施。安全监测主要包括PCCP管道沉降监测和交叉点附近PCCP管道上下游各20m的地表巡查;定向钻施工及施工完成后三个月内对PCCP管道进行沉降监测。

#### 3.2 安全监测

(1) 沉降监测:定向钻与鄂北工程管道交叉点处PCCP管道内径为3.8m,三根管道间距6.1m,管道覆土深度2.85m。为监测PCCP管道的变形情况,在定向钻施工前需在三根管道上各设一个观测井,井内埋设简易观测设备。观测井施工前应对PCCP管道进行准确探测后确定开挖范围,开挖时PCCP管顶预留50cm土体人工开挖。观测井内部净空尺寸不小于 $1.1 \times 1.5\text{m}$ 。若观测井正好位于PCCP管道承插口位置,可在承口和插口附近各布置一个简易观测点,否则简易观测点顺PCCP管道方向间距应大于100cm。

(2) 监测频次及精度要求:施工过程中定时定期对PCCP

管道进行沉降监测,管道上设置的3个沉降观测井在定向钻施工期每天测量一次,当定向钻施工至与PCCP管道交叉的下方时每4小时测量一次,施工结束后3个月内每周测量一次。当测量出现异常情况或沉降大于1cm时应进行复测,并立即停工并上报,评测后采取相关措施。

观测井沉降测量采用国家精密水准测量,工作基点埋设在沉降影响范围以外的稳定区域,要求距离管道不小于50m,测量精度相对工作基点的位移量中误差限值小于 $\pm 0.5\text{mm}$ 。沉降测点应在定向钻施工前安装埋设完成,并取得初始值。

(3) 巡视检查要求:对定向钻穿越鄂北管线交叉点附近PCCP管道上下游各20m范围内进行日常巡视检查。日常巡视检查的次数:定向钻施工期每天一次;施工完成后三个月内每周一次。如遇暴雨、地表湿润等异常情况加密巡查。

巡查内容包括:管道填土表面有无阴湿、渗水、管涌、流土或局部隆起等现象;管道填土有无沉降、开裂、滑移、塌陷等现象;管道观测井有无渗水情况;观测设施有无破坏等。

每次巡视检查均应做好详细的现场记录。如发现异常情况,除应详细记述时间、部位、险情和绘出草图外,必要时应测图、摄影或录像。对于有可疑迹象部位的记录,应在现场就地对其进行校对,确定无误后才能离开现场。日常巡视检查中发现异常情况时,应立即编写检查报告,并及时上报。

### 4 小结

经计算分析,输油管道定向钻孔洞所造成的PCCP管道底部最大沉降为2mm,远小于允许值。但由于PCCP管道施工期间管道之间或多或少存在相对转角且转角度数不确定,定向钻施工对管道运行安全仍有一定风险。在严格控制施工工艺和孔洞空隙回填灌浆的基础上,鄂北工程PCCP管道安全风险可控。定向钻施工应有一定的安全监测措施。安全监测主要包括PCCP管道沉降监测和输油管与PCCP交叉点附近PCCP管道上下游各20m的地表巡查。在定向钻施工及施工完成后三个月内对PCCP管道进行沉降监测。监测中如遇异常情况应及时上报。

#### 参考文献:

- [1] 鄂北地区水资源配置工程初步设计报告.
- [2] 公路与市政工程下穿高速铁路技术规程.
- [3] 鄂北工程下穿郑万铁路安全影响评估报告.
- [4] 临济管线张马路-中林路管段更换工程施工定向钻施工方案,徐州市中宇建设工程有限公司,二〇一五年十一月二日油气田及管道岩土工程勘察规范(SY/T 0053-2004)定向钻进管线穿越铺设技术规范,中国非开挖技术协会,2002.