

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.03.012

南水北调配套供水工程高速公路箱涵顶进关键技术

王全锋^{1,2}, 郑微微^{1,2}

(1. 黄河勘测规划设计研究院有限公司, 河南 郑州 450003; 2. 河南省城市水资源环境
工程技术研究中心, 河南 郑州 450003)

摘 要: 以南水北调 35 号分水口濮阳市供水配套工程穿越大广高速和濮鹤高速为例, 介绍有限元方法在管棚-箱涵法中的应用。通过采用 FLAC3D 对箱涵顶进计算数值分析, 模拟施工过程箱涵、管棚的受力情况以及顶进过程高速公路路面的沉降变形情况, 确定合理的施工组织设计, 在粉细砂地质条件下, 使用水平旋喷桩进行加固, 解决高速公路路面稳定的安全问题, 为工程按期通水提供技术保障。

关键词: 南水北调; 配套工程; 穿越高速; FLAC3D; 施工组织设计; 水平旋喷桩

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)03-0074-05

Key Technology of Expressway Culvert Jacking for Supporting Water Supply Projects of South-to-North Water Diversion Project

WANG Quan-feng^{1,2}, ZHENG Wei-wei^{1,2}

(1. Yellow River Engineering Consult Co. Ltd., Zhengzhou 450003, China; 2. Henan Engineering Research Center of Urban Water Resource and Environment, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: Application of finite element method in pipe shed-box culvert jacking method is introduced in No. 35 water diversion outlet of Puyang supporting water supply projects crossing Daguang Expressway and Puhe Expressway of South-to-North Water Diversion Project. Box culvert jacking calculation was analyzed by using FLAC3D, and stress of box culvert and pipe shed in the construction process and settlement and deformation of highway pavement during the jacking process were simulated to determine a reasonable construction organization design. Under the condition of silt fine sand, a horizontal jet grouting pile was used for reinforcement, so as to solve the safety problem of highway pavement stability. The results aim to provide technical support for water supply of the project on schedule.

Key words: South-to-North Water Diversion Project; supporting project; crossing expressway; FLAC3D; construction organization design; horizontal jet grouting pile

1 工程概况

35 号分水口门位于鹤壁市淇县新乡屯镇三里村西南总干渠右岸, 口门年均分配水量 $23\,990 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。该工程的主要任务是把南水北调分配给濮阳市的 $11\,900 \times 10^4 \text{ m}^3$ 水量通过输水管道工程措施安

全输送到濮阳市受水区目标, 其中输水干线 46.91 km, 采用 DN2 600 的 PCCP 管, 支线 8.23 km, 采用 DN2 400 的 PCCP 管。

浚县至濮阳段从鹤壁安阳市界(桩号 K40 + 727.599)向东北, 经南李庄北至宋小寨南后由西南

向东北从梁庄镇南穿过,至西郭寨西北约1 km处穿大广高速路,穿大广高速路后沿大广高速路东侧,于濮阳收费站西150 m处穿濮鹤高速,至范庄学校北折向东穿一小沥青路后沿S101(濮阳北外环路)南侧行至濮上北路到达规划水厂,全长约39.5 km。

濮阳段两处穿越高速是濮阳配套工程的控制性工程,具体穿越地理位置见图1。

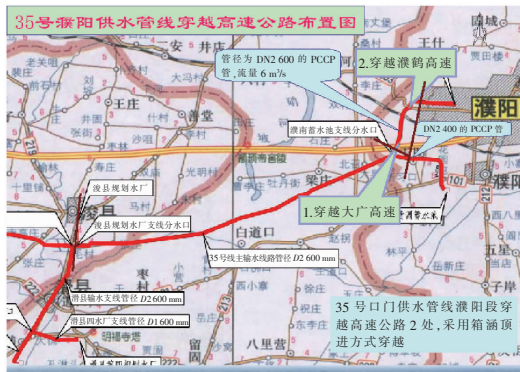


图1 穿越高速公路地理位置

Fig. 1 Location map of crossing expressway

① 管线穿大广高速公路处位于濮阳市王助乡西郭寨村西北约1 km,35号濮阳段输水管线中心桩号为K68+350,大广高速公路里程桩号约K1819+535处。

② 管线穿濮鹤高速公路位于濮阳收费站西150 m处,35号濮阳段输水管线中心桩号为K74+350。

工程地质:①工程场区位于华北平原,地貌单元属黄卫冲积平原,施工场地开阔,交通便利。②工程场区地震动峰值加速度为0.15g,相当于地震基本烈度为Ⅶ度。③场区地质结构为黏性土均一结构。建基面位于低液限粉土中。地下水埋深较大,不存在降排水问题,施工开挖边坡建议取(1:1.25)~(1:1.50)。低液限粉土承载力容许值 $[\sigma_0] = 150$ kPa,地基承载力相对较高。低液限粉土工程分级为Ⅱ类土,建议采用顶管或顶箱涵施工^[1]。④工程场区土对钢结构腐蚀等级为弱~中等腐蚀性。

2 工程重难点分析

地下穿越工程的大规模建设才刚刚兴起,相关理论、经验和应用技术仍显匮乏,集中表现在以下方面:①地表变形控制技术尚不成熟,很难真正做到对上部通行没有影响;②施工条件复杂,受地质条件影响较大,有较多的不确定性;③短期施工成本较大,

相对桥梁方案需要较大的资金投入等。正因如此,对现有地下穿越工程的规划、设计、施工进行全方面的跟踪研究,分析和解决在各个过程中出现的问题 and 难点,不仅可以在理论上加深对此类问题的认识,为实际工程的设计和施工提供科学依据,还可以在实践积累经验,为以后其他类似工程提供参考和借鉴。针对穿越繁忙的城市道路,为避免开挖及对地表环境的破坏,采用大断面管棚-箱涵顶进工法具有独特优势。

2.1 箱涵顶进计算数值分析

采用FLAC3D进行管棚-箱涵法施工力学分析,模拟施工过程箱涵、管棚的受力情况以及顶进过程高速公路路面的沉降变形情况。河南省南水北调受水区配套工程存在大量的穿越施工项目,为了达到研究的目的,本次选取濮阳施工02标35号供水管线穿越大广高速箱涵顶进为研究对象进行数值仿真模拟。

箱涵的施工设计见图2~4。

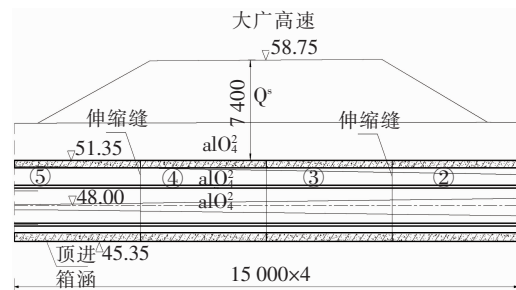


图2 箱涵纵剖面图

Fig. 2 Longitudinal section of box culvert

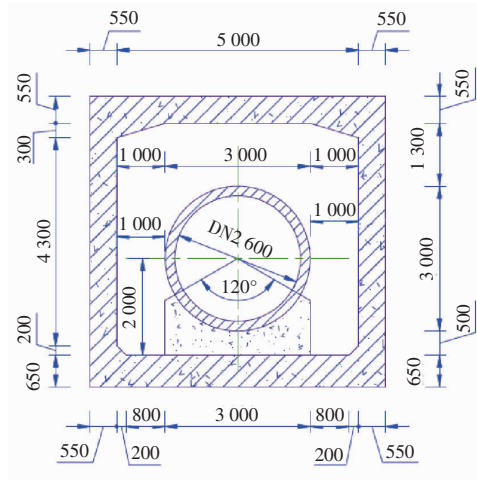


图3 箱涵断面图

Fig. 3 Box culvert section

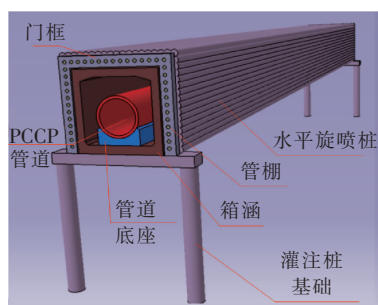


图4 箱涵三维图

Fig. 4 3D diagram of box culvert

穿大广高速处位于濮阳市王助乡西郭寨村西北约1 km, 35 号线该段为 DN2 600 的 PCCP 管, 穿越交叉点管线中心线高程为 48.00 m, 大广高速公路交叉点路面高程为 58.75 m。因此管线采用下穿方式穿越大广高速^[2], 结合箱涵断面(见图3), 确定合理的箱涵顶进标高为 51.35 m。

依据圣维南定理, 穿越大广高速典型工程模型左右边界及下边界取洞径的 3 倍^[3]: X 向(-20 m, 20 m)、 Y 向(-20.65 m, 12.65 m)和 Z 向(-60 m, 0 m)。单元采用 8 节点六面体等参单元, 单元共计 74 934 个, 节点共计 80 376。特别地, 为了真实模拟分缝对管节受力状态的影响, 分缝位置设置了接缝单元。

为了真实地反映施工对土体的扰动情况, 在数值仿真分析中选用合理的工况尤为重要。考虑实际施工过程的复杂性, 分析中按照实际情况将施工概化为以下步骤: 地应力场、管棚施工、管节顶进 1 m、开挖 1 m 循环施工。

地基沉降分析整体竖向变形图和路面变形图分别见图 5、6。

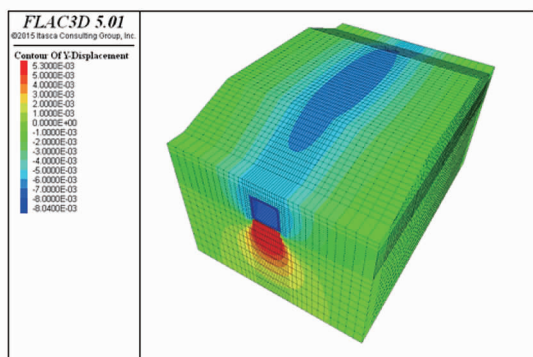


图5 整体竖向变形图

Fig. 5 Overall vertical deformation map

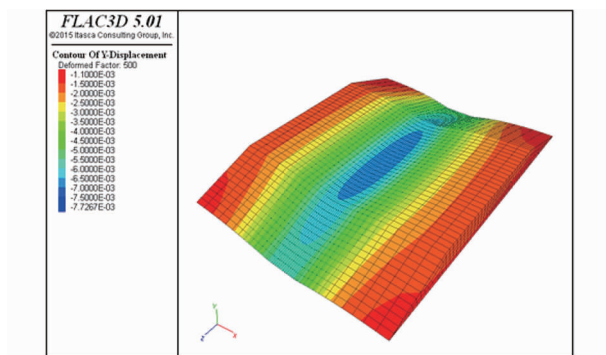


图6 路面变形图

Fig. 6 Pavement deformation map

具体表述如下:

① 对公路的影响范围: 沿道路方向影响范围 X (-10.5 m, 10.5 m), 该区域土体最大竖向位移为 7 mm, 箱涵中分线处最大, 两侧逐渐变小。

② 对箱涵地基的影响: 范围 Y (-13 m, 0 m) 和 x (-11.7 m, 11.7 m) 区域, 路基因开挖, 自重应力重分配带到土体向上隆起 5.3 mm, 箱涵顶下沉 8 mm。

考虑到施工期间高速公路正常通行, 地表测点沿垂直箱涵顶进轴线方向布置 2 个断面, 分别位于路面左、右路缘石内侧 20 cm 处。断面上测点按轴线对称布置, 道路西侧断面测点与轴线距离分别为 0、 ± 2 、 ± 5 、 ± 10 、 ± 15 、 ± 20 m, 共计 11 个测点; 道路东侧断面测点与轴线距离分别为 0、 ± 2 、 ± 5 、 ± 10 m, 共计 7 个测点; 工作基点布置在距离穿越处 150~200 m 位置, 共计 3 个, 具体布置见图 7。

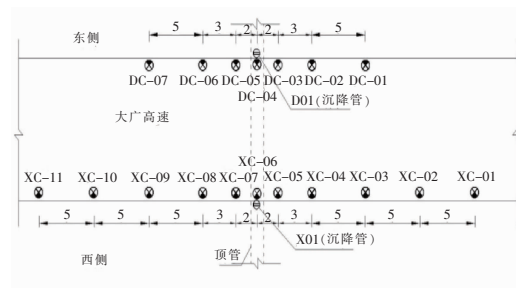


图7 沉降变形监测点平面布置

Fig. 7 Plane layout of settlement and deformation monitoring points

箱涵顶进工作于 2013 年 5 月 1 日由公路西侧开始, 至 6 月 7 日顶进工作结束, 完成地表沉降变形监测和深层土体变形监测共计 14 次, 选取部分典型数据, 各测点累计沉降量见表 1。

表 1 两侧断面各测点累计沉降量统计

Tab. 1 Statistics of accumulated settlement of each monitoring point on both sides of the section mm

测点	5 月 5 日	5 月 8 日	5 月 12 日	5 月 13 日	5 月 20 日	5 月 23 日	6 月 10 日
XC01	0.95	0.95	1.45	1.10	1.05	1.00	1.05
XC02	1.05	0.75	1.00	0.85	0.60	0.60	0.55
XC03	1.15	-0.05	-1.10	-1.70	-2.00	-2.20	-2.10
XC04	0.85	-3.70	-15.10	-23.30	-25.10	-25.30	-25.30
XC05	1.05	-8.90	-41.05	-76.00	-81.40	-82.50	-83.25
XC06	0.90	-78.35	-211.50	-437.10	-447.10		
XC07	0.90	-15.45	-66.80	-97.70	-104.70	-105.60	-106.00
XC08	0.65	-10.35	-38.95	-48.50	-53.20	-54.60	-55.00
XC09	1.05	-2.00	-5.05	-7.95	-10.80	-11.05	-11.20
XC10	1.10	0.25	-0.10	-0.10	-4.10	-4.80	-4.70
XC11	1.30	1.00	1.20	1.00	0.80	0.75	0.80
DC01	0.95	0.10	-0.15	-0.10	-0.80	-0.85	-11.25
DC02	0.80	0.10	-0.35	-0.35	-3.35	-13.75	-51.70
DC03	0.95	-0.05	-0.85	-0.85	-8.10	-16.80	-87.85
DC04	0.85	0.00	-0.70	-0.70	-14.25	-25.70	-140.50
DC05	1.10	0.15	-0.65	-0.75	-8.35	-17.50	-89.85
DC06	1.00	0.30	-0.25	-0.40	-3.60	-14.50	-52.20
DC07	1.40	0.40	0.00	0.00	-0.40	-1.65	-15.30

2.2 施工组织设计

① 箱涵顶进方案及施工流程

濮阳 35 号输水管线沿线穿越大广高速公路和濮鹤高速公路,采用管棚-箱涵顶进法施工。两端分别设始发坑和接收坑,箱涵在始发坑的滑板上预制、养护,再从由始发坑向接收坑顶进,箱涵顶进采用“管棚-箱涵顶进”施工方案。箱涵顶进工艺流程见图 8。

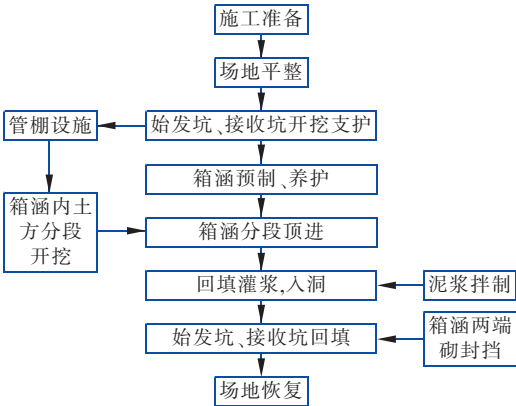


图 8 箱涵顶进工艺流程

Fig. 8 Flow chart of box culvert jacking process

② 工作坑尺寸的确定

根据输水管线布置及顶管长度,工作坑共布置 1 个始发坑和 1 个接收坑,工作坑平面型式为矩形。

顶进防护箱涵考虑在工作坑内预制,强度达到要求后直接顶进。经计算,确定了始发坑和接收坑的尺寸(见表 2)。

表 2 始发坑和接收坑尺寸

Tab. 2 Size of starting pit and receiving pit m

口门	穿越道路	始发坑			接收坑		
		底宽	底长	深	底宽	底长	深
35 号	大广高速	20	25	8.9	15	10	9.0
35 号	濮鹤高速	20	25	7.8	15	10	7.8

注: 以上数据根据工地实际采用的设备和开挖位置可进行调整。

在管棚-箱涵工法施工过程中,管棚间距大小是关注的主要问题之一:间距过小会造成工程投资浪费,同时也给施工带来较大困难;当管棚间距相对较小时,依靠棚间土体形成的“微拱效应”,使土体不至于向下滑出;而随着管棚间距的增大,“微拱效应”不断减弱,一旦管棚间距大于某一个临界值,土体将从棚间挤出或者绕着管棚滑动,管棚无法再起到有效的遮挡作用。管棚间距参考文献[4]公式计算,穿越大广高速及濮鹤高速箱涵顶进管棚设计方案为:管棚钢管采用直径 $\varnothing 245$ mm 的无缝钢管,每根管长 60 m,共 39 根,每两根管棚间距不大于 50 cm。钢管与孔壁之间的空隙必须压满水泥浆,不得留有空隙,保证管棚的完整性,管棚底距箱涵顶在入

口处不小于 20 cm, 出口处不得小于 30 cm。

管棚箱涵顶进断面周边线 80 cm 布设成“门型”, 钢管采用直径 $\varnothing 245$ mm 的无缝钢管, 间距 50 cm。布设方向与箱涵顶进方向平行并带 $1^\circ \sim 3^\circ$ 仰角, 管棚管采用有孔钢花管。注浆孔孔径 10 mm, 间距 20 cm, 在管上梅花形布置, 管尾部留 1.0 m 的止浆段。管棚搭设, 相邻管节接头位置相互错开。钢管入土端制作成尖靴状或楔形, 沿着布设轮廓线, 以较小的外插角, 向开挖面前方打入钢管, 钢管内灌注水泥浆, 以便提高钢管自身刚度和强度。灌注固结箱涵周边土体, 形成对开挖面的预支护。

超前管棚利用钢管作为纵向支撑, 浆液固结体作为横向联结, 构成一个框架, 有效地支撑和隔离上面的土体, 为超浅埋、大跨径顶推箱涵的施工提供了安全保障。管棚位于粉细砂地质条件, 经多种压力注浆现场试验取样, 超前注浆扩散加固的周围土体效果均不理想。设计方进行方案调整, 经现场水平旋喷桩加固试验后, 效果较好, 工程现场根据水平旋喷桩长管棚加固体取样检测, 对长管棚超前支护体设计进行了优化。之后设计方调整方案, 在穿越大广和濮鹤高速公路处采用水平旋喷桩进行长管棚加固。大广高速水平旋喷桩加固长度为 90 m, 濮鹤高速水平旋喷桩加固长度为 75 m。

3 结论与建议

① 通过在水利工程采用三维仿真数值模拟计算结合工程现场监测数据手段进行粉细砂地质条件穿越高速公路箱涵顶进技术的研究, 两者结合可以实时指导施工, 解决高速公路路面稳定的安全问题。

② 本工程设计先进性在于粉细砂地质条件下穿越高速公路首次使用水平旋喷桩进行长管棚加固。超前长管棚利用钢管作为纵向支撑, 水平旋喷桩浆液固结体作为横向联结加固, 构成一个框架, 有效地支撑和隔离高速公路路基, 为大跨径顶推箱涵的施工提供了安全保障, 解决了高速公路路面稳定的安全问题。

参考文献:

- [1] 中国工程建设标准化协会管道结构专业委员会. 给水排水工程顶管技术规程: CECS 246: 2008[S]. 北京: 中国计划出版社, 2008.
Committee of Pipeline Structure, China Association for Engineering Construction Standardization. Technical Specification for Pipe Jacking of Water Supply and Sewerage Engineering: CECS 246: 2008[S]. Beijing: China Planning Press, 2008 (in Chinese).
- [2] 建设部. 给水排水工程管道结构设计规范: GB 50332—2002[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
Ministry of Construction. Structural Design Code for Pipelines of Water Supply and Waste Water Engineering: GB 50332 - 2002[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2003 (in Chinese).
- [3] 《给水排水工程结构设计手册》编委会. 给水排水工程结构设计手册[M]. 2 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
Editorial Board of Handbook for Structural Design of Water Supply and Drainage Engineering. Handbook for Structural Design of Water Supply and Drainage Engineering[M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2007 (in Chinese).
- [4] 吴浩. 管棚—箱涵工法中管棚合理间距分析[J]. 地下空间与工程学报, 2008, 4(5): 927-931, 964.
WU Hao. An analysis of the spacing between pipes in pipe-roof box culvert construction method[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2008, 4(5): 927-931, 964 (in Chinese).

作者简介:王全锋(1984—), 男, 河南周口人, 硕士, 高级工程师, 主要从事长距离供水管线及泵站、市政给排水、海绵城市建设方向的设计研究工作, 在公开刊物上发表论文 6 篇, 获国家实用新型专利授权 9 项、省级工程咨询奖 4 项。

E-mail: wangqf@yrec.cn

收稿日期: 2019-06-17

修回日期: 2019-07-05

(编辑: 孔红春)