

# 柱洞法地铁车站施工临时横撑对梁—柱偏转的作用机理研究

邓治, 王树英

(1.郴州市城市规划设计院, 湖南 郴州 423000; 2.中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075)

**摘要:** 以石家庄地铁一号线某地铁车站为例, 采用三维数值程序分析柱洞法地铁车站施工过程中临时横撑对梁—柱偏转控制的作用机理。结果表明, 中洞二次衬砌扣拱施工时纵梁横向位移变化较大, 左、右洞开挖后梁—柱结构上部偏移量最大, 中洞开挖时左、右纵梁向中间变形, 中洞二次衬砌浇筑后结构向两侧变形, 边跨对称开挖时梁—柱结构左、右侧出现临空面而使结构向两侧变形, 左、右洞二次衬砌浇筑时梁—柱结构在其作用下向中间变形; 随着临时横撑间距的增加, 梁—柱结构的偏移不断增加, 间距为 3、6 m 时梁—柱结构的偏移量差别不大, 但间距为 9 m 时偏移量变化明显; 不同临时支撑间距下, 中洞二次衬砌施工后梁—柱结构的偏移变化基本一致, 仅中洞开挖过程中差别较明显, 立柱的偏心变化趋势相同, 临时横撑间距越大则立柱偏心越严重。

**关键词:** 隧道; 地铁车站; 柱洞法; 梁—柱偏转; 临时横撑

中图分类号: U458

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2017)04-0193-04

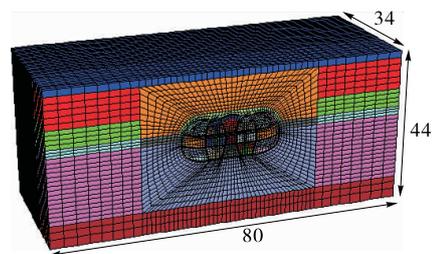
柱洞法施工梁—柱稳定性关系到隧道的整体安全, 研究柱洞法施工过程中梁—柱偏转控制很有必要。王梦恕等通过柱洞法施工试验段, 就暗挖车站设计、施工和监控进行探索, 揭露了支护结构的内力特征; 张国亮等运用有限元方法对柱洞法相关设计进行优化, 通过对比分析导洞和侧洞不同层高工况下地表沉降, 提出了上层洞室尽可能高、侧洞分 2 层开挖、纵梁间架设横撑的建议; 郑建国利用数值手段研究土岩地层柱洞法施工时地表沉降变化规律, 分析了埋深、洞径、地层参数及衬砌刚度对地表沉降的影响, 修正了土岩组合地区地铁车站施工引起地表沉降的影响函数及经验公式; 傅春青提出通过主动换撑措施来解决柱洞法二次衬砌浇筑过程中地表沉降过大的问题; 梁韵通过对大量已建地铁车站的统计调研, 指出柱洞法施工时梁—柱结构的偏移控制十分关键; 王振飞、房倩、姚海波和周倩等通过数值手段对比分析了柱洞法、中洞法和侧洞法施工地铁车站过程中各自的特点, 指出柱洞法在三者中引起地层变形最小, 能更好地控制地表沉降和既有线沉降。该文以石家庄地铁一号线某标段柱洞法施工地铁车站为依托, 采用三维数值分析方法研究隧道施工过程中临时横撑对梁—柱偏转的作用机理, 分析梁柱偏转随施工工序的变化, 探究临时横撑对梁柱偏转的影响特征, 为类似工程梁—柱稳定性控制提供技术依据。

## 1 数值模拟

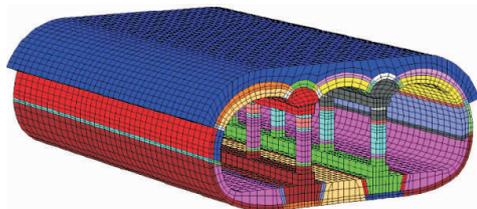
### 1.1 模型建立

#### 1.1.1 模型尺寸及边界条件

根据圣维南原理, 隧道开挖横向影响范围为 3~5 倍洞径, 结合长城桥暗挖段设计图, 考虑边界效应和计算时效性, 计算模型横向取 80 m, 纵向取 34 m, 向上取至地面, 向下取 1 倍车站隧道高度, 模型总高度为 44 m(见图 1)。边界条件为左右侧限定横向位移, 前后侧约束隧道走向位移, 下部约束竖向位



(a) 模型及网格划分(单位: m)



(b) 车站结构及加固圈模型

图 1 数值计算模型

移,上部为自由面。由于该区域为无水地层,无需考虑渗水边界。计算模型 zone 单元数为 132 534 个, grid-point 节点数为 138 016 个。

### 1.1.2 辅助工法和支护结构模拟

(1) 大管棚和超前小导管。现场采用  $\phi 108 \times 8$  mm 管棚,沿隧道环向间距 400 mm,纵向长度 10 m;超前小导管为  $\phi 42$  普通钢管,单根长度 2 m。参考类似地层和工程实例,在模拟过程中采用等效方法,通过提高一定范围内围岩的力学参数等效替代大管棚和超前小导管,将开挖线以外 0.8 m 内围岩的弹性模型提高 5 倍,粘聚力  $c$  和内摩擦角  $\varphi$  均提高 30%。

(2) 深孔注浆。无水粉细砂地层深孔注浆采用超细水泥+水玻璃双液浆,现场注浆效果为浆脉层状分布,大致为 3 层,上部 2 层厚度为 6~10 cm,第 3 层为 20~30 cm。计算过程中取平均值,上部 2 层取 8 cm,第 3 层取 25 cm。通过相关文献调研获得无水粉细砂地层劈裂浆脉的材料参数,在隧道开挖之前通过提高加固范围内材料参数模拟注浆效果,弹性模量提高 2 倍, $\varphi$  不变, $c$  提高 10%。

(3) 初期支护及临时结构。初期支护设计采用喷射砼+格栅钢架,按式(1)将格栅钢架通过提高砼的弹性模量予以简化,采用 shell 单元模拟初期支护,纵梁之间的临时横撑采用 beam 单元模拟,间距为 3 m。

$$E_{gc} = E_c + (S_g E_g) / S_c \quad (1)$$

式中: $E_{gc}$  为初期支护的弹性模量; $E_c$  为素砼的弹性模量; $E_g$  为格栅钢架的弹性模量; $S_g$  为截面格栅钢架的面积; $S_c$  为截面积。

(4) 二次衬砌。纵梁为钢筋砼结构,采用 C40 砼浇筑,钢管柱内灌注 C50 砼,中洞及左、右洞二次衬砌均为 C40 钢筋砼,二次衬砌钢筋均为 HRB400。采用实体单元模拟二次衬砌;钢混结构的钢管柱按压弯结构等效成单一的砼结构,采用实体单元模拟;钢筋砼则考虑钢筋对弹性模量的作用,等效弹性模量计算与初期支护一致。

### 1.2 材料参数选取

根据该地铁车站暗挖段地质勘察报告、相关规范及隧道设计资料确定模型计算中土体和支护结构的物理力学参数(见表 1),计算中不考虑水的作用。其中:土体采用 Mohr-Coulomb(MC)本构模型,加固体通过提高围岩参数来实现;初期支护为结构单元,二次衬砌为实体单元,均采用弹性模型。

表 1 围岩与支护结构的物理力学参数

地层或结构名称	重力密度/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	弹性模量/ MPa	粘聚力/ kPa	内摩擦角/ ( $^\circ$ )	泊松比
杂填土	17.0	10	15	20	0.35
黄土状粉土	18.7	60	30	15	0.32
黄土状粉质黏土	19.5	72	38	25	0.30
粉细砂	22.0	45	0	45	0.30
粉质黏土	19.7	100	33	18	0.28
注浆加固圈	22.0	1 000	120	40	0.28
初期支护	22.0	23 240	—	—	0.25
二次衬砌	25.0	33 500	—	—	0.25

### 1.3 施工步骤模拟

柱洞法施工工序繁多,这里将其简化为以下 8 个工序:

工序 1 为初始地应力平衡。模型建立完毕,赋予模型重力场,进行 solve 计算,再现原始地层。

工序 2 为超前大管棚及深孔注浆模拟。对初始地应力所产生的位移及速度进行清零,提高加固圈材料参数,进行 solve 计算。

工序 3 为左、右导洞开挖及支护。左、右导洞分上、中、下三台阶开挖,相邻台阶步距控制在 3 m,计算中每步开挖 1 m;考虑到初期支护拼装,初期支护 shell 落后掌子面 1 m 施工,左导洞上台阶落后右导洞下台阶 5 m,通过 FISH 语句实现左、右导洞动态开挖和支护过程。

工序 4 为纵梁及钢管柱施工。待左、右导洞贯通后,拆除部分初期支护,回填代表纵梁及钢管柱的实体单元,进行 solve 求解。

工序 5 为中洞开挖及支护。中洞分上、中、下三台阶开挖,台阶步距控制在 3 m,计算中每步开挖 1 m;考虑到初期支护拼装,初期支护 shell 落后掌子面 1 m,动态模拟整个施工过程,并通过 beam 单元模拟纵梁间的临时横撑,间距为 3 m。

工序 6 为中洞二次衬砌浇筑。待中洞贯通后,拆除左、右导洞靠近中洞的临时支护结构,回填中洞二次衬砌实体单元,进行 solve 计算。

工序 7 为左、右洞开挖。左、右洞为对称施工,分上、中、下三个台阶,台阶步距控制在 3 m,每步开挖 1 m,初期支护 shell 落后掌子面 1 m,动态模拟整个施工过程。

工序 8 为左、右洞二次衬砌浇筑。分仰拱和边墙两部分,待左、右洞贯通后,先拆除左、右导洞仰拱

临时结构,一次性浇筑仰拱,进行 solve 计算;边墙由上而下、左右错开拆除临时结构,纵向长度控制在 9.6 m,每拆除一段进行一次 solve 运算,计算完后回填相应位置的二次衬砌结构,并进行 solve 计算。

为验证数值模拟的准确性,选取导洞贯通后模型 K5+070.72 典型断面(模型对应 22 m 断面)现场测试的地表沉降监测数据与数值解进行对比分析,结果见图 2。由图 2 可知:左、右导洞贯通后地表沉降数值解的影响范围跟测试结果较接近,数值计算的最大沉降为 17.4 mm,处于车站中线左侧;现场实测数据为 16.2 mm,位于车站中线附近。虽然最大沉降的数值模拟结果、现场实测数据在数值和位置上存在一定差异,但对于如此复杂的岩土工程而言两者还是较接近,数值计算合理。

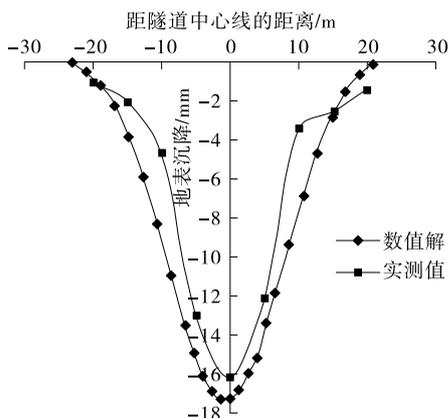


图 2 地表沉降对比分析

## 2 数值模拟结果分析

### 2.1 梁—柱结构水平偏转数值结果分析

选取模型 K5+070.72 典型断面附近左、右立柱的上、下两点(见图 3),通过跟踪其水平位移,揭露梁—柱结构偏移规律。图 4 为左、右纵梁的变形曲线,其中正值代表向右变形,负值代表向左变形。

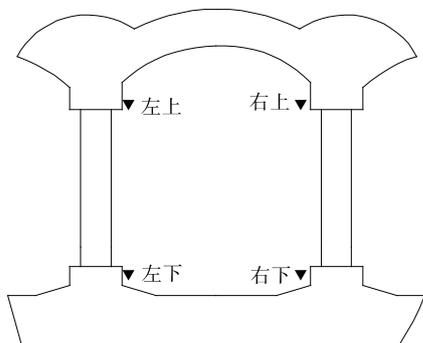
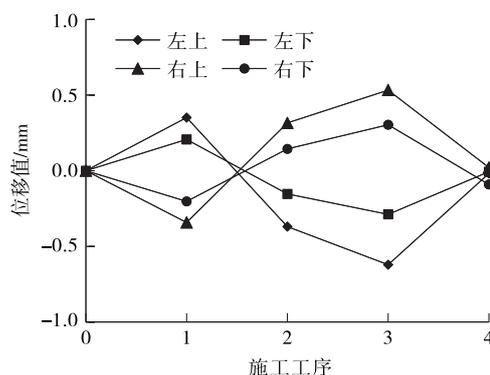


图 3 测点布置示意图



工序中,1 代表中洞贯通;2 代表中洞二次衬砌施工;3 代表左、右洞贯通;4 代表左、右洞二次衬砌施工。下同。

图 4 左、右纵梁水平位移变化曲线

由图 4 可知:在整个施工过程中,梁—柱结构上部受工序影响比下部更显著,且在中洞二次衬砌扣拱施工时变化较大,其中扣拱时左上位移为 -0.65 mm、左下为 -0.35 mm、右上为 0.72 mm、右下为 0.36 mm。在后续工序共同作用下,左、右洞开挖后梁—柱结构上部的偏移量达到最大,其中左上为 -0.62 mm、右上为 0.53 mm。中洞开挖时,左、右纵梁向中间变形;中洞二次衬砌施工赋予梁—柱结构水平荷载,结构向两侧变形;边跨对称开挖时,梁—柱结构左、右侧出现临空面,迫使结构向两侧变形;在左、右洞二次衬砌浇筑时,梁—柱结构在其作用下向中间变形。

### 2.2 临时横撑对结构偏转的影响

#### 2.2.1 纵梁的偏转情况

实际施工中临时钢管横撑直径为 400 mm,管壁厚度为 10 mm,间距为 3 m。为分析临时横撑对梁—柱结构偏转的影响,调整临时横撑的间距。无横撑和临时横撑水平间距为 3、6、9 m 下梁—柱结构在后续工序作用下的偏转情况见图 5 和图 6。

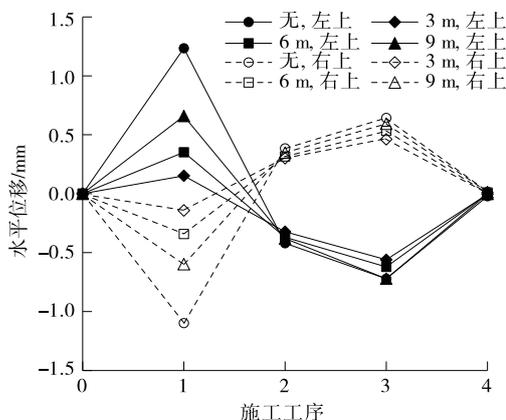


图 5 不同工序作用下顶纵梁偏转情况

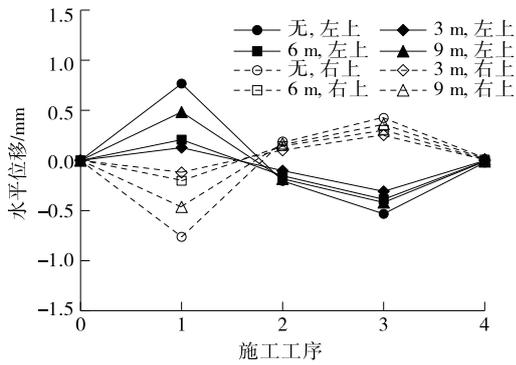


图6 不同工序作用下底纵梁偏转情况

由图5、图6可知:随着临时横撑间距的增加,梁一柱结构的偏移不断增加,间距为3和6m时,梁一柱结构的偏移量差别不大,但当间距为9m时,偏移量变化明显;在所有后续工序中,左、右纵梁的偏移变形基本一致,且顶纵梁发生的偏移量比底纵梁大;在所有工况下,中洞二次衬砌施工后梁一柱结构的偏移变化基本一致,只是在中洞开挖过程中差别较明显。

2.2.2 钢管柱的偏心情况

提取不同临时横撑间距作用下立柱单元受力情况,得到立柱中心断面的弯矩  $M$  和轴力  $N$  (见表2、表3),其中轴力以正表示受压,弯矩以正代表顺时针。立柱偏心距  $e_0 = M/N \times 100\%$ 。不同临时横撑间距下立柱偏心距  $e_0$  的变化情况见图7,正值代表向右侧偏,负值代表向左侧偏。

表2 临时横撑不同间距下的钢管柱轴力值

施工工况	不同间距(m)下的钢管柱轴力/kN			
	无横撑	3	6	9
梁一柱结构施工	103.7	103.7	103.7	103.7
中洞开挖	623.0	637.1	638.6	645.8
中洞二次衬砌施工	4 009.6	4 108.8	4 122.0	4 182.4
左、右洞开挖	5 731.2	5 868.8	5 877.2	5 923.2
左、右洞二次衬砌施工	10 976.0	11 040.0	11 328.0	10 976.0

表3 临时横撑不同间距下的钢管柱弯矩值

施工工况	不同间距(m)下的钢管柱弯矩/(kN·m)			
	无横撑	3	6	9
梁一柱结构施工	0.1	0.1	0.1	0.1
中洞开挖	38.1	27.0	23.3	14.5
中洞二次衬砌施工	-134.0	-133.9	-136.3	-132.6
左、右洞开挖	-235.0	-231.6	-229.6	-229.3
左、右洞二次衬砌施工	6.4	19.1	19.5	18.9

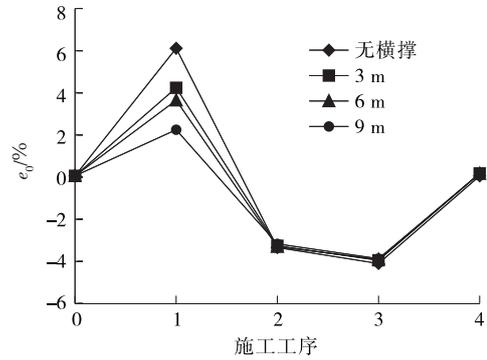


图7 临时横撑不同间距下立柱偏心距变化情况

由图7可知:在不同临时横撑间距下,立柱偏心情况变化趋势相同。中洞开挖时立柱向中间偏心,中洞二次衬砌施工完后向两侧偏心,左、右洞贯通进一步使立柱向两侧偏心,左、右洞二次衬砌浇筑完成后立柱成为轴心受压构件。临时横撑对立柱偏心的控制主要体现在中洞开挖阶段,且临时横撑间距越大,立柱偏心越严重。

3 结论

(1) 在中洞二次衬砌扣拱施工时纵梁横向位移变化较大,在后续工序共同作用下,左、右洞开挖后梁一柱结构上部的偏移量达到最大,中洞开挖时左、右纵梁向中间变形;中洞二次衬砌施工赋予梁一柱结构水平荷载,结构向两侧变形;边跨对称开挖时,梁一柱结构左、右侧出现临空面,迫使结构向两侧变形;左、右洞二次衬砌浇筑时,梁一柱结构在其作用下向中间变形。

(2) 随着临时横撑间距的增加,梁一柱结构的偏移不断增加,间距为3和6m时梁一柱结构的偏移量差别不大,间距为9m时偏移量变化明显。

(3) 不同临时支撑间距下,中洞二次衬砌施工后梁一柱结构的偏移变化基本一致,只是在中洞开挖过程中差别较明显。

(4) 不同临时横撑间距下,立柱的偏心情况变化趋势相同,临时横撑对立柱的偏心控制主要体现在中洞开挖阶段,且临时横撑间距越大,立柱偏心越严重。

参考文献:

[1] 王梦恕.地下工程浅埋暗挖技术通论[M].合肥:安徽教育出版社,2005.  
 [2] 王梦恕,刘招伟.浅埋暗挖法修建地铁站试验研究[J].

一支足够数量、高技术的专业复合型人才队伍。

### 3.4 建设安徽高速公路信息化综合管理平台

高速公路相关应用系统的开发利用是信息化建设的重中之重。应用程序的目标必须朝着无纸化办公、信息共享、网络化管理等方向发展。首先结合安徽省的实际情况,把能提高经济利益和社会福利的软件开发放在第一位,这样可使项目之间信息交流更方便、信息查阅与公布更规范。其次是开发出能为全社会提供最基础、通用服务的公共资源信息。从国家的角度来看,高速公路是一项服务型基础设施,它不仅要提供方便、轻捷的基本交通服务,还必须具有更加灵活使用的服务信息,这才是释放高速公路最大能量的最优途径。最后是要创建一个包含各种各样信息的大型数据库,不仅要有最普遍的高速公路信息数据,也要尽可能包含一些跨专业的综合信息。

## 4 结语

蚌淮(蚌埠—淮南)高速公路自开工之日起便推行项目建设全程信息化管理,通过科研立项成立专门的课题研究小组,根据安徽高速公路项目的特点,基于现阶段的软件技术、网络环境、硬件条件、管理制度研发了一套立足安徽高速公路项目建设市场、面向全国高速公路建设项目推广的新一代项目可视化管理平台,为响应交通运输部提出的管理手段信息化递交了一份答卷。

### 参考文献:

- [1] 刘喆.建设工程项目信息管理[M].北京:北京科技出版社,2005.
- [2] 王绪明.关于工程项目管理信息化建设的几点思考[J].江西建材,2013(6).
- [3] 蒋帅.建筑企业信息化管理研究[D].北京:北京交通大学,2012.
- [4] Louis Raymond, Francois Bergeron. Project management information systems: an empirical study of their impact on project managers and project success[J]. International Journal of Project Management, 2008, 26(2).
- [5] Frederik Ahlemann. Towards a conceptual reference model for project management information systems [J]. International Journal of Project Management, 2009, 27(1).
- [6] Ali Jaafari, Kitsana Manivong. Toward a smart project management information system[J]. International Journal of Project Management, 1998, 16(4).
- [7] 卢利群.建筑工程管理信息化应用探析[J].现代物业:上旬刊,2011(7).
- [8] 金玲.工程项目信息化管理的现状研究及对策分析[J].中外建筑,2010(12).
- [9] 孟衍,朴东梅.吉林省高速公路信息化建设的现状、问题及对策[J].产业与科技论坛,2014(17).

收稿日期:2017-03-13

\*\*\*\*\*  
(上接第196页)

- 隧道建设,1990(4).
- [3] 张国亮,张振刚.单层大跨度暗挖地铁车站柱洞法施工探讨[J].铁道建筑,2005(3).
  - [4] 郑建国.土岩组合地层大跨度浅埋暗挖车站施工环境效应研究[D].青岛:中国海洋大学,2011.
  - [5] 傅春青.城市暗挖大跨地铁车站“洞柱法”施工沉降控制措施[J].隧道建设,2007(增刊2).
  - [6] 梁韵.暗挖地铁车站设置原则与施工工法选取研究[D].北京:北京交通大学,2011.
  - [7] 王振飞,张成平,王剑晨,等.新建地铁车站近距离上穿既有地铁区间隧道施工方案的选择[J].中国铁道科学,2013,34(5).
  - [8] 房倩,张顶立.浅埋暗挖地铁车站下穿既有有线结构施工方法研究[J].中国铁道科学,2007,28(5).
  - [9] 姚海波.大断面隧道浅埋暗挖法下穿既有地铁构筑物施工技术研究[D].北京:北京交通大学,2005.

- [10] 周倩.暗挖大断面地铁车站侧洞法和洞柱法施工力学转换机理对比研究[D].北京:北京交通大学,2008.
- [11] 侯朝炯,勾攀峰.巷道锚杆支护围岩强度强化机理研究[J].岩石力学与工程学报,2000,19(3).
- [12] 李力.粉细砂地层注浆管棚作用机理及在暗挖隧道施工中的应用[D].北京:北京交通大学,2007.
- [13] 贺博.粉细砂层硅化双液注浆加固机理及工程应用研究[D].西安:西安建筑科技大学,2013.
- [14] 李东勇,徐祯祥,王琳静.地铁暗挖隧道初期支护联合系统数值模拟分析[J].铁道建筑,2007(5).
- [15] TB 10003-2005,铁路隧道设计规范[S].
- [16] 李权谋,刘胜,雷赛男,等.浅埋暗挖隧道穿越既有地铁加固方案优化分析[J].公路与汽运,2016(5).
- [17] 桂金本,刘文兵,周锦强.暗挖地铁车站柱洞法施工梁一柱结构防偏技术研究[J].铁道标准设计,2016(12).

收稿日期:2016-12-28