

# 大断面地铁车站隧道初期支护参数优化研究

徐国<sup>1</sup>, 王猛<sup>2</sup>, 高峰<sup>1</sup>, 吴世伟<sup>1</sup>

(1.重庆交通大学 土木建筑学院, 重庆市 400074; 2.中车建设工程有限公司)

**摘要:** 大断面地铁车站隧道越来越多,其施工安全性日益引起人们的重视,其中地铁大断面隧道支护参数与其安全性之间关系的相关文献还不多见报道,有必要进行研究。该文以重庆地铁四号线头塘车站工程为依托,采用数值方法,分析模拟了拱部预留T形岩梁核心土双侧壁导坑法的施工过程,并与监控量测结果进行了对比。从安全和经济两个方面对浅埋暗挖特大断面头塘车站隧道开挖初期支护的锚杆长度、间距和钢拱架间距等参数进行了优化研究。

**关键词:** 监控量测; 设计优化; 支护参数; 大断面隧道; 地铁车站

## 1 引言

城市轨道交通建设由于受复杂环境的限制,修建大断面浅埋暗挖隧道不可避免,也是现代施工技术面临的巨大挑战。近年来,重庆地区建设了大量的超大断面隧道工程,如重庆轻轨3号线与6号线换乘站红旗河沟站、轻轨2号线临江门站工程;其中陈林杰、王国欣等研究了超大断面浅埋暗挖隧道的开挖方法;蒋树屏、丁改改等进行了大断面隧道施工方案的优化研究;李明、王亮对浅埋偏压大断面隧道时空效应与支护时机进行了研究;郑瑞永、金洋洋等对深埋隧道锚杆的支护参数进行了优化研究。这些研究主要在隧道施工方法、支护的时空效应和深埋隧道的支护参数优化上,而浅埋暗挖大断面隧道的支护参数优化研究还非常不足,未形成系统、完善的参数选择方法,相关标准、规范的参考作用相当有限,再加上工程跨度大、具体工程地质条件和周边环境的复杂性,所以难以直接套用已建工程的成功经验,这对于减少工程成本、加快施工进度、节约资源非常不利。因此,对大断面地铁车站隧道的支护参数优化进行研究十分必要,该文结合重庆地铁四号线头塘车站工程,对大断面隧道的支护参数进行相关研究。

## 2 工程概况

头塘车站暗挖隧道为四号线与九号线换乘车站,

是重庆地铁四号线的核心工程。车站总长237 m,开挖面积大,属于超大断面浅埋暗挖隧道。头塘站为地下3层岛式暗挖车站,呈东西向布置轨道交通,四号线与九号线叠岛设置,四号线在上,九号线在下,净宽23.1 m,净高25.34 m,里程K17+360处于双层滑裂带处;车站掌子面岩层为砂质泥岩,车站隧道拱顶覆盖层厚度20.0~32.4 m,地表人工填土厚度2.1~3.0 m。围岩级别为Ⅳ级,衬砌内轮廓线为三心圆曲墙,中隔墙采用预留T形岩梁;由于断面过大,二次衬砌采用由底向上逐渐完成,最终形成整体全环向闭合。

初期支护结构如图1所示。施工方法:拱部预留T形岩梁状核心土双侧壁导坑法施工,具体施工工序见图2。

施工步骤:

- (1) 双侧壁①步开挖,做初期支护。
- (2) ①部开挖后底部施加钢支撑,双侧壁第②、③、④步开挖,做初期支护。
- (3) 底部仰拱施作,二次衬砌由底往上进行至第①步开挖边墙截止处止,二衬与双侧壁已开挖部分的碎石回填同时进行,以免还没有形成闭合的二衬断面产生变形。
- (4) 进行第⑤、⑥步开挖,施作初期支护。
- (5) 第⑦步开挖并施做初期支护,对第⑦步形成的最终隧道拱顶进行加固处理。
- (6) 第⑤、⑥、⑦步施做二次衬砌,使二衬断面形成一个闭合圈。

收稿日期:2018-11-02

作者简介:徐国,男,硕士研究生,E-mail:1052663363@qq.com

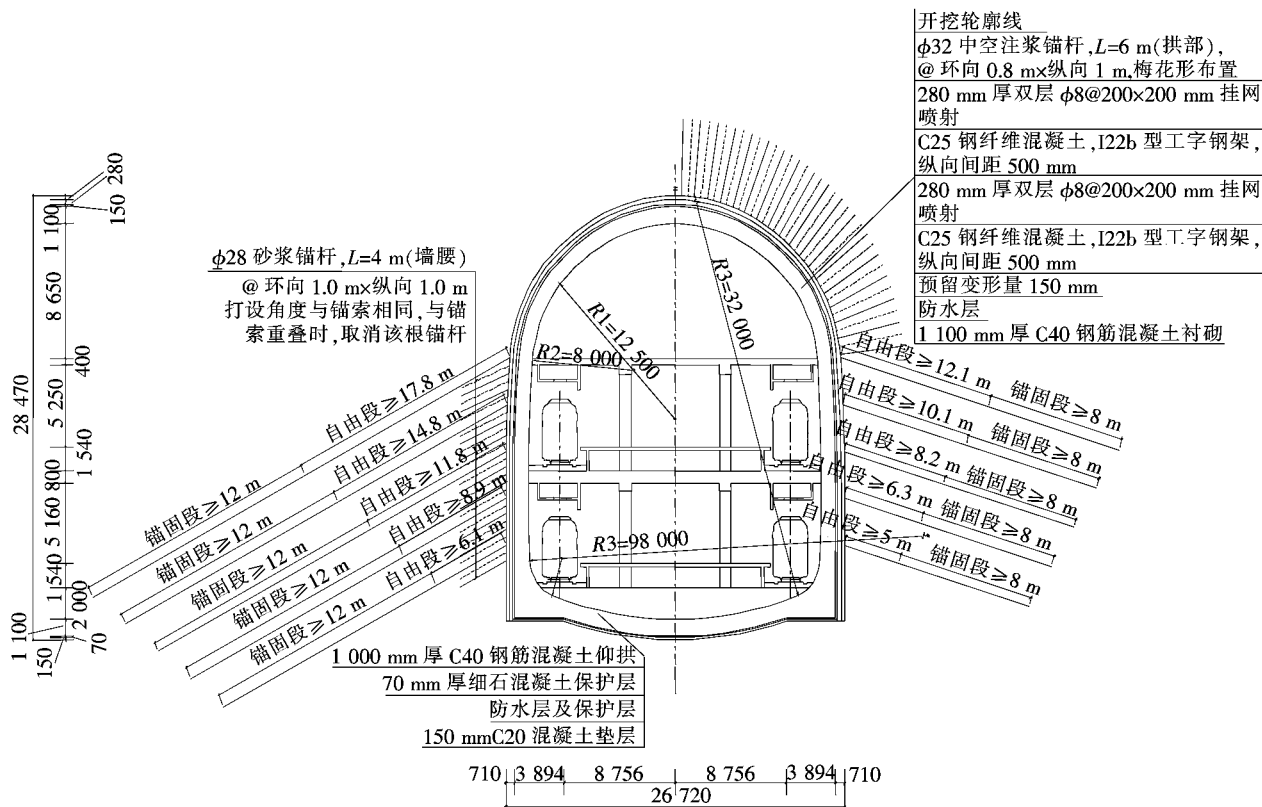


图 1 初期支护结构图(单位:mm)

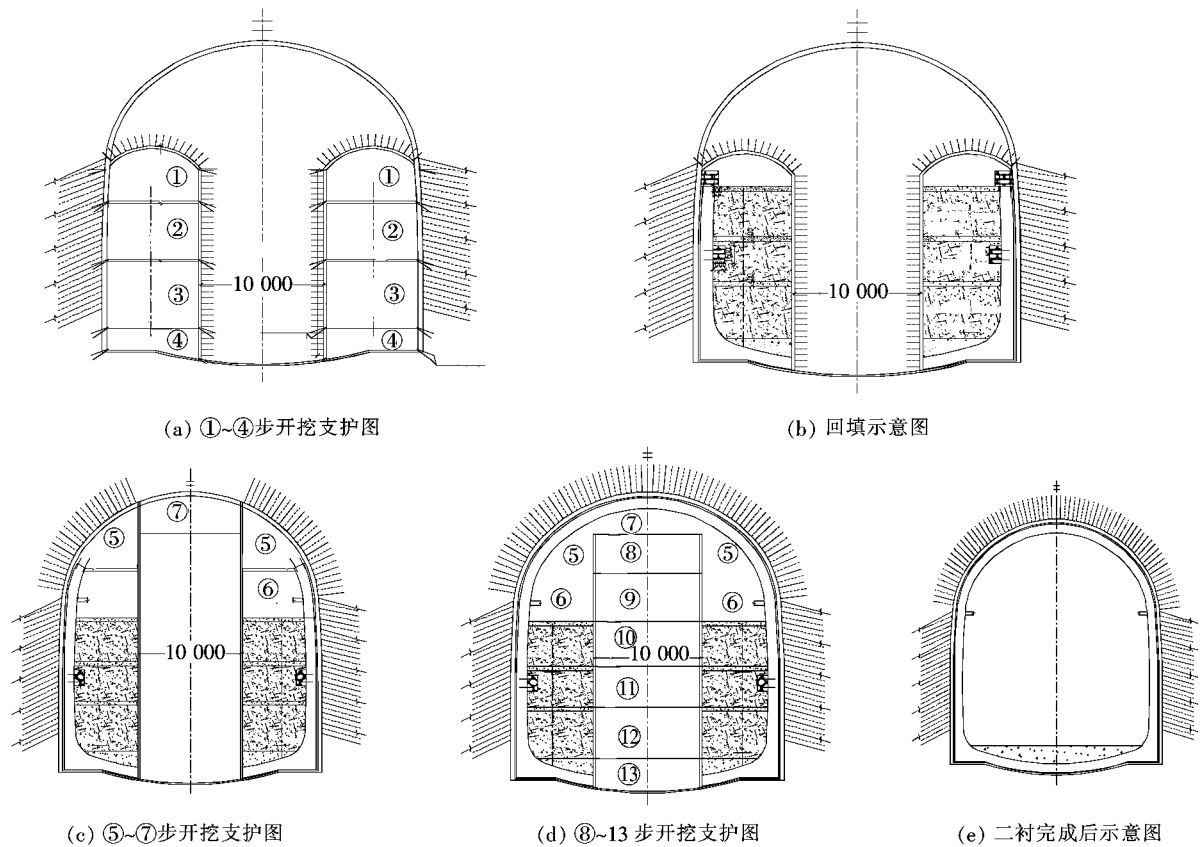


图 2 施工工序(单位:mm)

(7) 开挖第⑧~⑬步,同时开挖回填双侧壁的碎石,最终形成开挖面积大的超大断面隧道。

3 大断面地铁车站隧道初期支护参数优化

3.1 计算模型

(1) 计算假设和边界条件

① 隧道及围岩受力和变形是平面应变问题;② 岩体初始应力场仅考虑自重应力;③ 围岩视为非线性材料,其余均视为弹性材料;④ 允许围岩边界有竖直方向的位移,所以左右边界节点仅定义 X 方向的节点位移为 0;而下边界节点既不能有水平位移也不能产生竖直位移,所以对下边界所有节点定义 X 和 Y 方向位移均为 0。

(2) 计算参数

计算模型选取开挖面具有两条滑裂带的断面 K17+360;模型拱顶距上边界约 30 m,底拱距下边界 85 m,左右边墙分别距左右边界 80 m。钢支撑和初期支护喷射混凝土采用梁单元,尺寸为 1.0 m;锚杆为 1D 植入式桁架单元,尺寸为 1.0 m;锚索采用锚具建模助手建立,智能手动确定锚固长度和张拉长度;二次衬砌采用 2D 实体单元实现。最终网格划分见图 3,共 8 581个单元。围岩和支护材料参数见表 1。

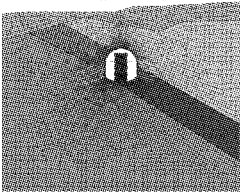


图 3 模型网格图

表 1 围岩和支护材料参数

材料名称	弹性模量/GPa	泊松比	重度/(kN·m <sup>-3</sup> )	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa
中风化砂岩	5.640	0.10	24.8	41.8	2 010
中风化砂质泥岩	1.440	0.37	25.6	32.6	570
加固土	3.800	0.31	25.6	36.0	680
素填土	0.004	0.30	18.5	30.0	30
滑裂带	0.600	0.30	23.0	20.0	5
折算后 C25 喷射混凝土	27.200	0.20	22.0	—	—
C40 混凝土	36.200	0.20	25.0	—	—

通过数值模拟和监控量测数据对比,两者结果基本吻合,但是拱顶沉降和净空收敛与预警值相差较大,支护参数可进一步优化。

3.2 单变量优化分析

单个变量优化就是只允许一个量的变化,从而去对比参数变化所引起结构内力、位移的变化。

3.2.1 锚杆长度间距优化

只限于锚杆长度间距的变化,而锚索间距随着锚杆间距变化而变化,选取锚索左侧长度为 21、19、17、15 m,锚固端为 8 m;右侧长度分别为 15、13、11、11 m,锚固端为 6 m,钢拱架间距选 1.0 m。根据 JTG D70—2004《公路隧道设计规范》锚杆参数,此次模拟计算选取锚杆间距分为 1.2 m 和 1.5 m,锚杆分为边墙锚杆和拱顶锚杆,边墙锚杆长度分为 2.5、3.0 和 3.5 m,拱顶锚杆分为 3.0、4.0 和 4.5 m,锚杆间距和长度两两对应,一共选取了 6 个工况(见表 2),各工况的计算结果见表 3。

表 2 计算工况

工况	锚杆长度/m		锚杆间距/m	钢拱架间距/m	左侧锚索/m	右侧锚索/m
	拱顶	边墙				
1	4.5	3.5	1.2	1	8+13,8+11,8+9,8+7	6+9,6+7,6+5,6+5
2	4.5	3.5	1.5	1	8+13,8+11,8+9,8+7	6+9,6+7,6+5,6+5
3	4.0	3.0	1.2	1	8+13,8+11,8+9,8+7	6+9,6+7,6+5,6+5
4	4.0	3.0	1.5	1	8+13,8+11,8+9,8+7	6+9,6+7,6+5,6+5
5	3.0	2.5	1.2	1	8+13,8+11,8+9,8+7	6+9,6+7,6+5,6+5
6	3.0	2.5	1.5	1	8+13,8+11,8+9,8+7	6+9,6+7,6+5,6+5

由表 3 可知:

(1) 拱顶沉降位移:锚杆越长,拱顶沉降越小;锚杆长度也不是越长越好,边墙锚杆从 3.0 m 增至 3.5

m,拱顶锚杆从 4.0 m 增至 4.5 m,沉降位移值没有什么变化。说明锚杆长度对拱顶围岩的变形有一定的影响。

表 3 不同锚杆长度间距下衬砌受力计算结果

(边墙锚杆 长度,拱顶 锚杆长 度)/m	锚杆间距 1.2 m						锚杆间距 1.5 m					
	净空	拱顶	锚杆最	锚索最	初期支护		净空收	拱顶沉	锚杆最	锚索最	初期支护	
	收敛/ mm	沉降/ mm	大轴 力/kN	大轴 力/kN	最大拉应 力/MPa	最大压应 力/MPa	敛位 移/mm	降位 移/mm	大轴 力/kN	大轴 力/kN	最大拉应 力/MPa	最大压应 力/MPa
(2.5,3.0)	5.43	8.68	34.1	600.7	0.619	3.880	5.453	8.806	40.1	607.5	0.679	4.22
(3.0,4.0)	5.18	8.60	33.3	598.5	0.647	3.870	5.208	8.654	38.3	601.5	0.827	4.091
(3.5,4.5)	4.86	8.598	33.8	598.6	0.679	3.873	5.204	8.657	38.0	601.8	0.829	4.084

(2) 净空收敛位移:锚杆越长,净空收敛值越小;边墙锚杆从3.0 m 增至3.5 m,拱顶锚杆从4.0 m 增至4.5 m,当间距为1.5 m 时,收敛值并没有什么影响,但是间距为1.2 m 时,收敛值仍在减小。说明锚杆间距对水平围岩的变形有一定的影响。

(3) 锚杆轴力:① 拱顶处锚杆轴力最大,边墙锚杆轴力较小,但处于滑裂带处锚杆轴力也较大;② 边墙锚杆长度从2.5 m 到3.0 m,拱部锚杆长度从3.0 m 增至4.0 m 时,锚杆轴力有一定程度上的减小,之后再增加锚杆长度,最大轴力值变化趋于平缓,说明随着锚杆长度的变化,锚杆最大轴力值变化较小。

(4) 锚索轴力:边墙锚杆长度从2.5 m 到3.0 m,拱部锚杆长度从3.0 m 增至4.0 m 时,锚索轴力有一定程度上的减小,之后再增加锚杆长度,最大轴力值变化趋于平缓,说明随着锚杆长度的变化,锚索最大轴力值变化较小。

(5) 初支应力:① 初期支护在拱部位置处、滑裂带处和边墙底部应力集中处压应力最大,在锚杆间距1.2 m,边墙锚杆长度2.5 m,拱部锚杆3.0 m 时,边墙底部最大压应力达到4.22 MPa;② 随着锚杆长度增大,

初期支护最大压应力有所减小,但变化很小,说明锚杆长度变化对初期支护压应力影响不大;初期支护最大拉应力随着锚杆长度增大而增大。

综上所述,边墙锚杆长度为2.5~3.5 m,拱部锚杆长度在范围内变化时,引起的围岩位移、初期支护内力和锚杆、锚索轴力变化很小。综合考虑这些因素,建议边墙锚杆长度取3.0~3.5 m,拱部锚杆长度建议取4.0~4.5 m。

3.2.2 钢拱架间距优化分析

只限于钢拱架间距的变化,将锚杆长度、间距、锚索长度设为不变量,钢拱架间距就成了唯一变量,这样可以直接看出钢拱架间距与洞周支护的关系。

边墙锚杆长度取 3.0 m,拱部锚杆长度取 4.0 m,锚杆间距取 1.2 m;锚索间距与锚杆一致为 1.2 m,左侧取长度为 21、19、17、15 m,锚固端为 8 m;右侧取长度分别为 15、13、11、11 m,锚固端为 6 m。根据 JTG D70—2004《公路隧道设计规范》钢拱架间距参数,模拟计算选取钢拱架间距分为 0.5、0.75、1.0 和 1.5 m 总共 4 个工况(见表 4),计算结果见表 5。

表 4 计算工况

工况	锚杆长度/m		锚杆间 距/m	钢拱架 间距/m	左侧锚索/ m	右侧锚索/ m
	拱顶	边墙				
1	4	3	1.2	0.50	8+13,8+11,8+9,8+7	6+9,6+7,6+5,6+5
2	4	3	1.2	0.75	8+13,8+11,8+9,8+7	6+9,6+7,6+5,6+5
3	4	3	1.2	1.00	8+13,8+11,8+9,8+7	6+9,6+7,6+5,6+5
4	4	3	1.2	1.50	8+13,8+11,8+9,8+7	6+9,6+7,6+5,6+5

由表 5 可知:

(1) 拱顶沉降位移:钢拱架间距越大,拱顶沉降越大。说明钢拱架间距对拱顶围岩的变形有很大程度的影响。

(2) 净空收敛:钢拱架间距从 0.5 m 增至 0.75 m 时,净空收敛增加很明显,但是从 0.75 m 增至 1.5 m 时,收敛值都没有变化。说明钢拱架间距对水平围岩的变形有一定的影响。但是钢拱架间距过大时,对净

表 5 不同钢拱架间距下衬砌受力计算结果

钢拱架间 距/m	拱顶沉 降/mm	净空收 敛/mm	锚杆轴 力/kN	锚索轴 力/kN	初支	
					最大拉应力/MPa	最大压应力/MPa
0.50	8.604	4.894	36.1	598.1	0.637	4.056
0.75	8.637	5.160	36.9	598.4	0.647	4.091
1.00	8.654	5.180	37.3	598.5	0.657	4.124
1.50	8.671	5.180	37.5	598.5	0.677	4.188

空收敛值几乎没有影响。

(3) 锚杆、锚索轴力:钢拱架间距越大,锚杆轴力值越大,锚索轴力值也越来越大,当钢拱架间距为 1.0 m 和 1.5 m 时,锚索轴力几乎不变。说明钢拱架间距对锚杆和锚索轴力有一定的影响。但是钢拱架间距过大时,对其轴力值影响较小。

(4) 初期支护应力:钢拱架间距越大,初期支护拉应力、压应力值越小。说明钢拱架间距对初期支护应力有很大程度的影响。

综上所述,钢拱架间距为 0.75~1.5 m 时,引起的围岩位移、初期支护内力和锚杆、锚索轴力变化较小。再综合考虑其他因素,建议钢拱架间距宜取 1.0~1.5 m。

3.3 综合优化分析

综合优化分析是考虑了锚杆长度和间距、钢拱架间距、锚索长度这 4 个变量约束的优化,从而对比每种工况所引起结构内力、位移、塑性区、造价的变化。

根据规范给出的初期支护参数,模拟计算选取锚杆长度和间距、钢拱架间距每个约束优化两个参数,锚索长度优化一个参数,组合共得 16 种工况,从中选取 6 个典型工况(表 6),进行模拟计算,对模拟结果进行分析对比,各工况的计算结果见表 7、图 4、5。

由表 7、图 4、5 可以看出:

(1) 拱顶沉降,工况 5 较大,其余工况都比较小。

(2) 净空收敛,工况 1、5、6 较大,工况 2、3、4 都较小。

表 6 计算工况

工况	锚杆长度/m		锚杆间 距/m	钢拱架间 距/m	左侧锚索/ m	右侧锚索/ m
	拱顶	边墙				
1	4.5	3.5	1.2	1.0	8+13,8+11,8+9,8+7	6+9,6+7,6+5,6+5
2	4.5	3.5	1.5	1.5	8+13,8+11,8+9	6+9,6+7,6+5
3	4.0	3.0	1.2	1.5	8+13,8+11,8+9,8+7	6+9,6+7,6+5,6+5
4	4.0	3.0	1.5	1.0	8+13,8+11,8+9	6+9,6+7,6+5
5	3.0	2.5	1.2	1.0	8+13,8+11,8+9,8+7	6+9,6+7,6+5,6+5
6	3.0	2.5	1.5	1.5	8+13,8+11,8+9	6+9,6+7,6+5

表 7 不同工况下各影响因素关系

工况	无滑裂带锚杆 最大轴力/kN	滑裂带处锚杆 最大轴力/kN	锚索最大 轴力/kN	初支最大压 应力/MPa	初支最大拉 应力/MPa	塑性区/ dm <sup>2</sup>	总价格/ 元
1	37.99	105.76	598.57	4.084	0.795	211.25	21 640.90
2	39.75	54.19	601.88	3.847	0.910	192.41	15 521.98
3	37.77	88.47	598.58	4.056	0.768	202.63	17 067.15
4	33.31	51.09	601.53	3.87	0.927	196.28	19 304.13
5	40.39	140.17	600.73	4.22	1.004	277.12	20 460.96
6	54.87	34.2	607.56	3.85	0.761	200.96	14 599.59

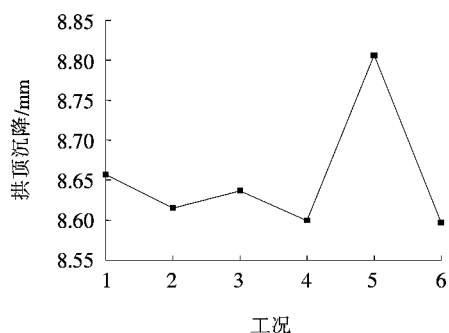


图4 不同工况拱顶沉降图

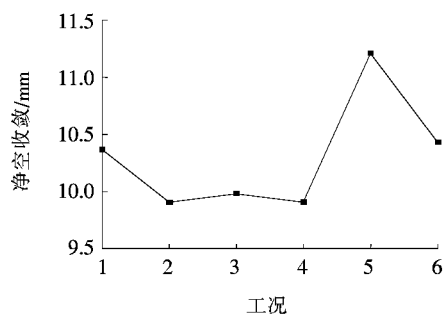


图5 不同工况净空收敛图

(3) 锚杆轴力,分为滑裂带和非滑裂带,滑裂带处除工况5轴力较大外,其余工况都较小,非滑裂带各工况轴力都相差不大。

(4) 锚索轴力,锚索间距为1.2 m(工况1,3,5)时锚索的轴力普遍小于间距为1.5 m(工况2,4,6),可知锚索间距越大,轴力越大。

(5) 初期支护轴力和剪力,各工况相差均不大,各参数的变化对其影响较小。

(6) 塑性区,只有工况5数值较大,其余工况相差不大且均较小。

(7) 造价方面,工况2、3、6较小,工况1、4、5造价较高。

综合优化分析:从造价来看,工况2、3和工况6造价较低,适合在这3种工况中选择;再从安全的角度考虑,结合前文对比分析,得出工况3是最优的设计参数。

## 4 结论

通过计算分析,对大断面地铁车站隧道初期支护参数优化研究,得出以下结论:

(1) 通过单变量优化分析,从技术和经济方面比较,分别给出了锚杆间距和长度、钢拱架间距单个量变化的情况下合理的大断面隧道衬砌支护参数,体现出支护参数的改变对隧道开挖稳定性的影响。

(2) 在锚杆长度和间距、钢拱架间距、锚索长度这4个因素综合考虑的情况下,对比了6组典型支护参数的受力与变形,得出该隧道的最优初期支护参数方案(工况3),不仅从经济上减少了成本,也从技术上保证了施工安全。所得成果可为类似工程提供依据。

## 参考文献:

- [1] 杜虎.浅埋软岩隧道围岩变形规律和支护受力特性研究[D].北京交通大学硕士学位论文,2014.
- [2] 晋学辉.红旗河沟大型暗挖车站施工力学研究[D].重庆交通大学硕士学位论文,2012.
- [3] 陈林杰,梁波,王国喜.浅埋暗挖超大断面地铁车站隧道开挖方法研究[J].地下空间与工程学报,2013(4).
- [4] 王国欣,肖龙鸽,王玉岭.城市浅埋超大断面隧道的开挖方法探讨[J].隧道建设,2009(6).
- [5] 朱泽兵,刘新荣,张永兴.大跨超浅埋轻轨车站隧道开挖方法研究[J].岩石力学与工程学报,2005(2).
- [6] 蒋树屏,胡学兵.云南扁平状大断面公路隧道施工力学响应数值模拟[J].岩土工程学报,2004(2).
- [7] 丁改改,姜海,孔祥兴.非等大断面小净距地铁隧道施工方案分析及优化[J].隧道建设,2014(8).
- [8] 黄伦海,程崇国,蒋树屏,等.轻轨地下车站主体结构设计与施工研究[J].岩石力学与工程学报,2005(10).
- [9] 王亮.浅埋偏压大断面隧道时空效应与支护时机研究[D].重庆交通大学硕士学位论文,2017.
- [10] 郑瑞永.隧道围岩锚杆支护参数优化分析[J].湖南城市学院学报:自然科学版,2015(4).
- [11] 金洋洋.隧道锚杆支护参数优化分析[D].重庆交通大学硕士学位论文,2015.
- [12] 章荣军,郑俊杰,杨庆年.地震作用下浅埋隧道系统锚杆参数优化[J].华中科技大学学报:自然科学版,2009(5).
- [13] Sang-lim No, SELTNG-hwan Noh, Sang-pil lee, etc. Construction of Long and Large Twin Tube Tunnel in Korea — Sapaesan Tunnel [J]. Tunneling and Underground Space Technology 2006, 21: 393.
- [14] 倪红梅.数值模拟锚杆参数对支护结构水平位移的影响[J].煤炭工程,2007(2).