

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2015.01.043

一种斜向大断面拱座单桩基础隧道式CRD法 开挖三维数值分析

王秋会,张金夫,宋林

(中铁一局集团有限公司技术中心 土木研究所,陕西 西安 710054)

摘要:某大桥拱座基础为斜向大断面单桩基础,具有大型基坑和隧道受力的特点,空间受力复杂,很有必要研究其力学行为。采用摩尔库伦屈服准则,考虑材料的弹塑性,通过MIDAS GTS软件建立三维整体模型,计算分析了CRD法开挖施工过程中围岩、初支、中隔壁、横撑应力、变形的情况,归纳出随着开挖步施进初支最大主拉、压应力的分布曲线和位移曲线图。结果表明该施工方案初支拉、压应力及变形均较小,开挖至距离基础底约8米处为变形和应力最大处,对施工方案的制定和施工监测有重要的参考作用。

关键词:斜向基础;大断面;CRD法;数值模拟;力学行为

中图分类号: TU473.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2015)01-0205-05

3-D Numerical Simulation Analysis of A Single Pile Skewback Foundation with Large Inclined Section Using CRD Tunnel Excavation Method

WANG Qiu-hui, ZHANG Jin-fu, SONG Lin

(Civil Engineering Research Institute, China Railway First Group Co. Ltd., Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract: A form of single pile foundation with oblique large cross section is applied in an arch bridge abutment foundation. With the characteristics of large foundation pit and tunneling excavation, the foundation is under complex mechanical stress. So it is necessary to study and discuss its mechanical behavior. Considering the elastic-plasticity of the materials by using Mohr-Coulomb criterion, the three-dimensional integrated model was established by Midas-Gts software to calculate the situation of the primary support, surrounding rocks, medium septum, transverse bracing and deformation during the CRD excavation. And then with the progress of the excavation, the distribution and displacement curves of the maximum principal tensile and compressive stress of the primary support were concluded. The results suggest that the tensile and compressive stress of the primary support as well as the deformation are all smaller by the CRD excavation method, and the maximum value of the stress occurs when the foundation base is about 8 meters deep. The research results have some referential significance to the planning of the construction scheme and the monitoring of the construction progress.

Keywords: inclined foundation; large section; CRD method; numerical simulation; mechanical behavior

1 研究背景

对于开挖施工的三维问题,工程实际中一般将其简化为二维问题。目前平面分析手段主要有广义虚拟支撑力法^[1]和等效初应力法^[1-2]等。该法带有

较强的经验性及某些适用限制条件等不足^[3],近似反映了开挖面的空间效应。但是对一些复杂特殊的工程,采取三维分析才能更好地反映开挖过程中围岩变形及支护结构的空间效应。三维有限元分析目前已在很多工程实际中被尝试和应用,如海底隧道

及浅埋、偏压隧道等工程^[4-10]。

本文以某实际桥梁工程为背景,该桥的拱座基础同时具有基坑和隧道的特点,基础洞身穿越Ⅳ、Ⅴ级围岩段,且为浅埋隧道,具有特殊性和新颖性。计算分析时着重考虑自重作用下的初始应力场,忽略构造应力的影响。

1.1 工程简介

该拱桥为 1 m~370 m 上承式钢筋混凝土 X 形(提篮)拱桥^[11],其拱座基础为斜向大断面单桩基础。受力复杂,斜向长 42 m,为贯入式大体积嵌岩基础,与水平方向夹角 55.19°,平面位置夹角 9.488°。

施工采取隧道式开挖,混凝土浇筑为大体积圬工,施工分层多次灌注,并埋设散热水管等措施。属低山构造剥蚀沟谷地貌,区内植被发达。施工范围内地层为单斜构造,基岩性质为(9-5)砂岩夹泥岩和(9-6)泥岩夹砂岩,依次交替,厚度为 10 m、8.5 m、23 m,围岩物理特性较好。覆盖层较薄,施工时清表,不予考虑。斜向高度 42 m,长 22.5 m,宽 16.39 m,具体尺寸、位置见图 1。开挖初支(内衬)断面图见图 2。

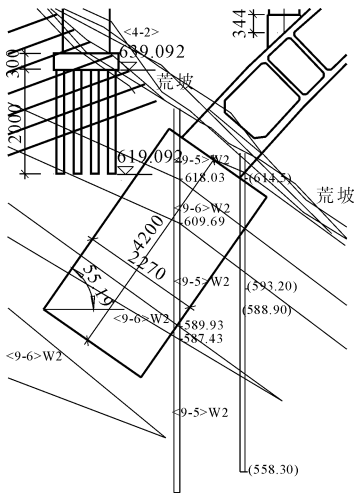


图 1 拱座基础与斜向地层状况示意图

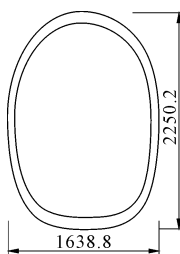


图 2 拱座单桩开挖内衬断面图(单位:cm)

1.2 开挖方案

拱座基础开挖采用 CRD(Center Diaphragm)法,又称中隔壁法。该法将大断面隧道分割为小断面洞室施工^[12],有效的缩短了开挖围岩的早期施工时间,扼止了开挖围岩应力变化,有利于隧道安全施工。该施工方法主要适用于Ⅴ级围岩浅埋强风化层、土层、断层破碎带或熔岩发育区及Ⅳ级围岩偏压、浅埋软弱地层段施工。

该基础具体施工开挖顺序,如图 3 所示:(a)拱顶部 145°范围采用 A42 超前小导管进行预加固,小导管长 3.5 m,纵向间距 2.0 m,计算中不考虑该项的加固效果;(b)开挖①土体,安设 HW300×300 型钢骨架,间距 60 cm,喷 35 cm 厚 C30 混凝土;同时施做中隔壁,开挖完成后施做横撑,横撑采用 25 cm 厚 C30 混凝土,内嵌 HW200×200 热轧型钢结构;(c)同样,开挖②土体,施做初支及支撑;(d)开挖③土体,施做初支及中隔壁;(e)开挖④土体,初支闭合形成环。反复以上步骤,逐步进深。左右开挖纵向步距 5 m,上下开挖的纵向步距 10 m。

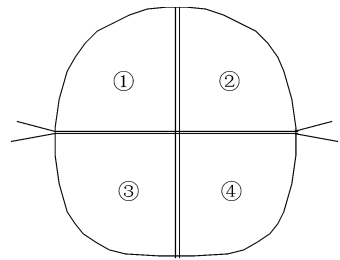


图 3 开挖顺序示意图

2 研究内容及方法

2.1 有限元模拟开挖的原理

一般隧道岩土开挖施工过程主要包括岩土分步、分层开挖,进而分步、分层设置支护结构。有限元分析中对不同施工阶段力学性态方程为:

$$([K_0] + [\Delta K_i])\{\Delta \delta_i\} = \{\Delta F_{ir}\} + \{\Delta F_{ia}\} \quad (i = 1, L) \quad (1)$$

式中: L 为施工阶段数; $[K_0]$ 为初始状态岩土的初始总刚度矩阵; $[\Delta K_i]$ 为开挖施工中岩土体及支护结构的刚度增、减量; $\{\Delta F_{ir}\}$ 为开挖边界上的等效释放力; $\{\Delta F_{ia}\}$ 为第 i 阶段新增等效节点力; $\{\Delta \delta_i\}$ 为第 i 阶段产生的节点位移增量。

采用常刚度增量迭代法考虑土体的非线性和弹塑性状态,其方程为:

$$[K_{i0}]\{\Delta \delta_i\}^k = \{\Delta F_i\}^k \quad (i = 1, L; k = 1, N) \quad (2)$$

式中: N 为非线性迭代步数。

对位移、应变和应力的计算,增量迭代公式为:

$$\begin{cases} \{\delta_i\} = \{\Delta\delta_{i-1}\} + \{\Delta\delta_i\} = \sum_{\lambda=1}^i \sum_{k=1}^N \{\Delta\delta_{\lambda}\}^k \\ \{\epsilon_i\} = \{\Delta\epsilon_{i-1}\} + \{\Delta\epsilon_i\} = \sum_{\lambda=1}^i \sum_{k=1}^N \{\Delta\epsilon_{\lambda}\}^k \\ \{\sigma_i\} = \{\Delta\sigma_{i-1}\} + \{\Delta\sigma_i\} = \sigma_0 + \sum_{\lambda=1}^i \sum_{k=1}^N \{\Delta\sigma_{\lambda}\}^k \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\{\delta\}$, $\{\epsilon\}$, $\{\sigma\}$ 分别为位移、应变和应力向量; $\{\sigma_0\}$ 为初始地应力; $\{\Delta\sigma_{\lambda}\}$ 为任意施工阶段的应力增量。

综上,即得数值模拟分析的位移、应变和应力结果。

2.2 模型与参数

隧道开挖后的应力和应变,仅在隧道周围距离洞室中心点 3 倍~5 倍隧道开挖宽度范围内存在影响。因此土体模型宽度取 147 m,高度 141 m。对边界约束,因顶部斜面为地面,为自由面;底部面为固定约束,周边面为法向约束。

围岩土体采用四面体单元。初喷射混凝土采用程序析取功能生成板单元的方法处理,初支材料特性按照型钢和混凝土组合截面模量考虑。总单元数约 34 462 个,板单元总数 2 520 个。三维网格模型见图 4。

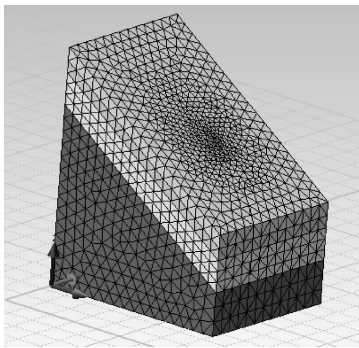


图 4 整体三维网格模型图

围岩、初支和支撑材料特性见表 1。

表 1 岩土材料特性值

材料名称	变形模量/GPa	泊松比	重度/(kN·m ⁻³)	粘聚力/kPa	摩擦角/(°)
<9-6> IV级围岩	3.00	0.33	21	30	30
<9-5> V级围岩	1.50	0.40	19	10	25
锚喷 C30	37.28	0.20	24	—	—

每步施工工况,严格按照前述施工工序完成,共 58 步。图 5 和图 6 为模拟的某开挖步示意图。

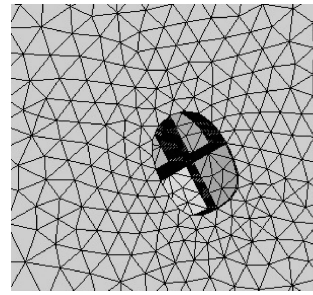


图 5 某步开挖示意图

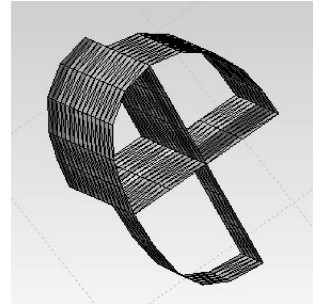


图 6 某步初支及支护示意图

3 结果分析

3.1 应力、位移曲线图

当隧道施工完毕后(即第 58 步开挖时间步完成后),归纳出所有开挖步中最大主拉应力和最大主压应力曲线图和位移曲线图,见图 7 和图 8。

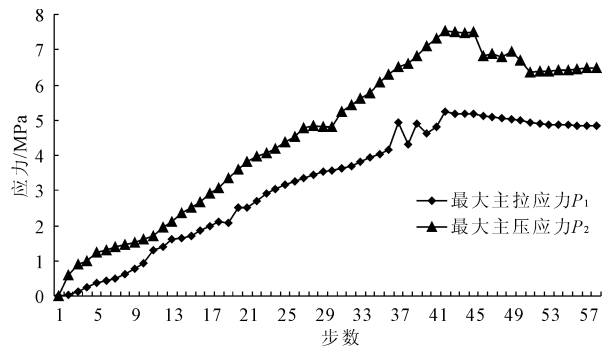


图 7 最大主拉与最大主压应力曲线图

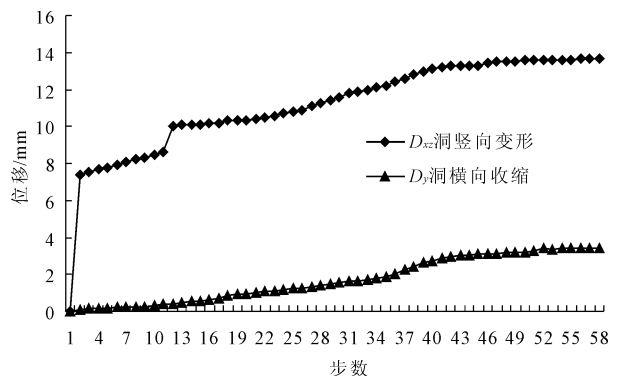


图 8 位移曲线图比较

由图 7 知,最大主拉应力和最大主压应力自开挖施进逐步增大,至第 43 步达到峰值,最后略有回落。最大主压应力仅为 7.59 MPa。该步为开挖完①土体、施做初支前为受力最大处。

由图 8 知,最大位移发生在第 52 步,即开挖完最后一步土体,未施做初支前。竖、横向位移均增长缓慢,竖向位移在 1 cm 左右变化,横向收缩最大值约 3 mm。

3.2 应力、位移云图

从应力和位移两方面来讨论开挖方案的合理性,从而对此施工方案进行验证。进一步得出最大应力云图见图 9 与图 10;最大位移云图见图 11 与图 12。

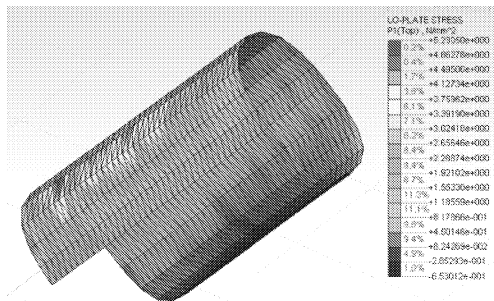


图 9 最大主拉应力云图 P_1 (单位:MPa)

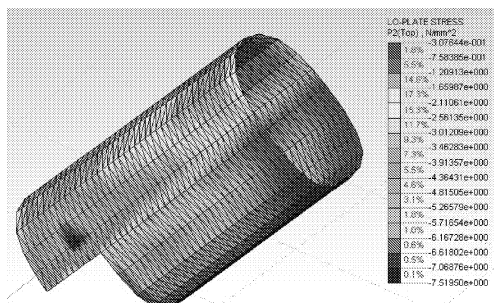


图 10 最大主压应力云图 P_2 (单位:MPa)

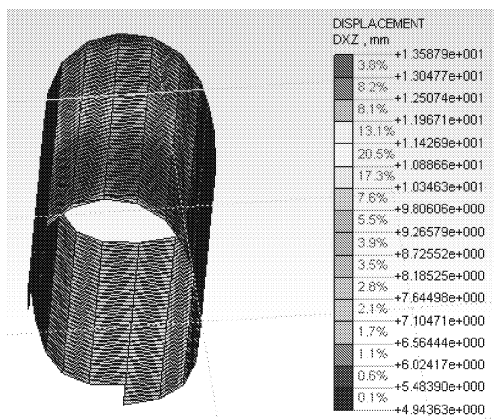


图 11 拱顶最大竖向位移 D_{xz} (单位:mm)

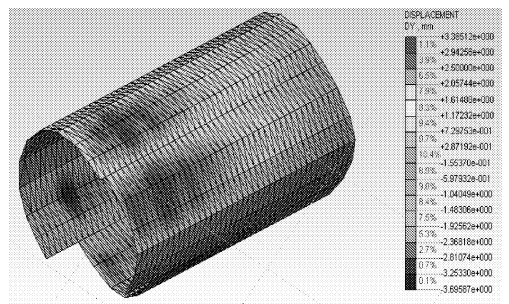


图 12 横向收缩位移 D_y (单位:mm)

初支最大应力发生在第 43 步,即距离基础底面约 8 m。混凝土初支最大主拉应力为 5.23 MPa,发生在拱顶;最大主压应力 7.59 MPa,位置在拱腰横隔墙的上部约 5 m 位置。

最大位移发生在开挖完最后一步、未施做初支前,拱顶最大竖向位移 $D_{xz} = 13.6$ mm,横向收缩位移最大 $D_y = 3.4$ mm,最大位移位置均在距离基础底面约 8 m 处。

4 结论与建议

根据以上分析,由应力、位移曲线图可以明确反映出最不利状态出现在哪个施工步,从而有针对性的加强监控量测;由应力、位移云图可以详细的反映该步施工时的初支应力和变形的详细分布状态,从而确定应加强的支护位置,指导施工方案的调整。

(1) 开挖过程中初支拉、压应力均较小。参照工程实例,拉压应力均在可控范围,拉应力可以通过加强配置钢筋等措施抑制混凝土开裂。如前分析,在开挖完最后一步,未作初支护前,为最危险位置,施工时应严格控制初支、及隔墙和横撑的施工质量。

(2) 开挖过程中变形均较小,有利于采空区上部土体稳定。在开挖距离基础底面约 8 m 处,即第 43 步时,施工控制中应加密该处监测,提前预知,谨慎防控。

(3) CRD 法由于其各个小分区封闭成环块,隔墙仰拱有效地减小和控制了结构的初期下沉和变形。因此在施工过程中应坚持,“弱爆破、短进尺、强支护、早封闭、勤量测”的原则。

(4) 临时横撑对拱顶沉降和水平收敛起关键作用,各步施工中横撑设置的迟早尤为重要,CRD 法各个局部应尽早、尽快成环。施工中应特别注意横撑端头连接的牢靠,确保整体受力。

(5) 施工过程中若遇到地质破碎带、节理裂隙发育等不良地质,应根据监测结果随时动态调整施

工方案。

参考文献:

- [1] 孙 钧. 地下工程设计理论与实践[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1996.
- [2] 王建宇. 隧道开挖引起的围岩变形过程及岩体变形模量的反分析[J]. 土木工程学报, 1986, 19(2): 71-79.
- [3] 李新星, 朱合华, 丁文其, 等. 连拱隧道施工过程的三维空间效应模拟与分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(S): 256-260.
- [4] 牛泽林. 伏龙坪双层隧道三维有限元分析[J]. 中南公路工程, 2007, 32(3): 144-146.
- [5] 王渭明, 黄明琦, 吴克新. 厦门翔安海底隧道 CRD 法施工数值分析[J]. 山东科技大学学报: 自然科学版, 2007, 26(2): 27-31.
- [6] 余 健, 何 川. 软弱围岩段隧道施工过程中围岩位移的三维弹塑性数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报,

2006, 25(3): 623-629.

- [7] 牛泽林, 谢永利, 李德武. 双层公路隧道各施工方案的模拟与研究[J]. 延边大学学报: 自然科学版, 2010, 36(2): 174-176.
- [8] 孔祥兴, 夏才初, 仇玉良, 等. 平行小净距盾构与 CRD 法黄土地铁隧道施工力学研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(2): 516-524.
- [9] 万俊峰. CRD 工法在客运专线隧道建设中的应用与思考[J]. 铁道勘察, 2013, (3): 65-68.
- [10] 赵永国, 邵生俊, 韩常领. 浅埋、偏压隧道开挖施工方案的仿真分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(S2): 509-513.
- [11] 中铁二院工程集团有限责任公司. 改建铁路重庆至贵阳线扩能改造工程施工图设计文件[R]. 成都: 中铁二院工程集团有限责任公司, 2012.
- [12] 铁道部经济规划研究院. TZ 204 - 2008 铁路隧道工程施工技术指南[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2008.

(上接第 197 页)

参考文献:

- [1] 郑海君. 软岩特性研究及其对边坡影响的敏感性分析—以紫坪铺水利工程为例[D]. 成都: 成都理工大学, 2005.
- [2] 熊诗湖. 层状岩体变形特性试验研究[D]. 武汉: 长江科学院, 2007.
- [3] 陈文玲. 黑河水库坝肩边坡云母石英片岩三轴蠕变机理及蠕变模型研究[D]. 西安: 长安大学, 2009.
- [4] 杨更社, 孙 钧. 中国岩石力学的研究现状及其展望分

析[J]. 西安公路交通大学学报, 2001, 21(3): 5-9.

- [5] 贺汇文. 秦岭变质岩区岩体结构特征及公路边坡稳定性研究[D]. 西安: 长安大学, 2009.
- [6] 丁秀丽. 岩体流变特性的试验研究及模型参数辨识[D]. 武汉: 中国科学院, 2005.
- [7] 闫小波. 软岩各向异性渗透特征及力学特征的试验研究[D]. 上海: 同济大学, 2006.
- [8] 张学民. 岩石材料各向异性特征及其对隧道围岩稳定性影响研究[D]. 长沙: 中南大学, 2007.