

文章编号: 1000-5013(2013)01-0087-05

红土地层中 CRD 法开挖隧道 沉降变形及结构内力分析

张定邦¹, 朱金凤²

(1. 湖北理工学院 土木建筑工程学院, 湖北 黄石 435003;
2. 山东省淄博市公路管理局, 山东 淄博 255038)

摘要: 采用交叉中隔墙(CRD)法,开挖红土地层中双线铁路隧道.通过现场量测和 ANSYS 有限元模拟相结合的方法,研究开挖过程中隧道的拱顶沉降、弯矩和支护轴力的变化规律.研究结果表明:CRD1 开挖产生的拱顶沉降约占整体沉降为 36%,拱顶下沉曲线通常为最后趋于收敛的非线性上升曲线;CRD1 开挖产生的轴力约占最终轴力的 42%~49%,整个开挖过程中结构的轴力基本呈非线性增大趋势.

关键词: 交叉中隔墙法;红土地层;拱顶沉降;轴力;弯矩

中图分类号: TU 554 **文献标志码:** A

双线铁路隧道开挖半径大,在地质条件复杂、软弱围岩及埋深较浅处,通常采用交叉中隔墙(CRD)法进行隧道开挖.CRD 法实际上是一种带有临时仰拱的中隔墙施工方法,一种分布开挖的方法.CRD 法能解决大跨度超浅埋结构隧道的围岩稳定性问题,其最大特点是将大断面化成小断面,步步成环.每个施工阶段都是一个完整的受力体系,结构受力明确,变形小,沉降量小^[1].文献[2]对 CRD 法在修建隧道施工过程中应用进行了研究;文献[3]研究福建厦门海底隧道开挖过程中的地层三维变形状态;文献[4]探讨了大跨度隧道 CRD 法穿越含水软弱层沉降变形控制;文献[5]结合实际监控量测数据,对软弱地层大断面海底隧道进行施工稳定性分析.红土是一种具有高含水率、低密度,而强度较高、压缩性较低特性的土^[6-7],在中国分布面积达 200 万 km²^[8].随着我国高速铁路网的新建,必然涉及到在红土地层中开挖隧道的技术课题.因此,本文对 CRD 法在红土地层中开挖隧道过程中的变形、弯矩和支护轴力变化规律进行研究.

1 现场监控量测

黄石谈山隧道穿越湖北省黄石市谈家山脉,是连接黄金山新区与黄石市区的重要通道,为单洞双线隧道.全长 715 m,洞高 11.8 m,跨度 14.9 m,是红土地区典型的浅埋大断面隧道,施工难度大.隧道开挖前,采用直径为 100 mm 超前小导管进行注浆加固.隧道开挖时,在隧道拱部和边墙采用长为 3 m 的锚杆进行加固.

1.1 隧道监测断面方案

选取的断面为分 6 部开挖的 CRD 法断面,断面形式、开挖顺序及测点布置如图 1,2 所示.断面的埋深为 5~11 m,初期支护为 30 cm 的喷射混凝土,钢筋网直径为 8 mm,间距为 20 cm×20 cm.锚杆为 D32 中空注浆锚杆,长为 300 cm.纵环向间距为 75×100,梅花型布置.超前支护为超前导管.共选取 20 个监测断面,它们具有相同的施工方法、断面形式、支护方式以及相似的土层性质、埋深等.

收稿日期: 2012-05-25

通信作者: 张定邦(1982-),男,讲师,主要从事地下建筑方面的研究. E-mail: ericzdb@126.com.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(2011053035);湖南省自然科学基金资助项目(20114195);湖北理工学院青年基金资助项目(12XJZ36Q)

1.2 拱顶下沉量监测数据

各部开挖对最终拱顶下沉量(Δ_{tot})的影响如表 1,2 所示.

由表 1 可知:1) CRD1 开挖产生的拱顶沉降占整体沉降的比例(η)最大,占 36%~41%,因而控制 CRD1 的沉降量对减小最终拱顶沉降有很大的意义;2) CRD2 的开挖对 CRD1 拱顶下沉的影响居第 2 位,占 15%~20%;3) CRD3 的开挖对 CRD1 拱顶下沉的影响占最终拱顶下沉值的 12%~16%;4) CRD4 ,CRD5 和 CRD6 的开挖对 CRD1 拱顶下沉的影响逐渐减小.

由表 2 可知:1) CRD4 的开挖对本部拱顶下沉的影响最大,其量值占最终拱顶下沉值的 51%~62%;2) CRD5 的开挖对 CRD4 拱顶下沉的影响占 CRD4 最终拱顶下沉值的 20%~27%;3) CRD6 的开挖对 CRD4 拱顶下沉的影响占 CRD4 最终拱顶下沉值的 14%~23%.

表 1 各部开挖引起的 CRD1 拱顶下沉量
Tab.1 Subsidence of CRD1 caused by excavation of each step

开挖部位	$\eta/\%$						$\Delta_{\text{tot}}/\text{mm}$
	CRD1	CRD2	CRD3	CRD4	CRD5	CRD6	
断面 1	41.2	19.2	12.7	15.9	6.2	4.8	50.7
断面 2	38.7	15.7	12.2	15.2	8.7	9.5	48.7
断面 3	37.5	16.3	14.8	15.6	9.5	6.3	46.2
断面 4	41.4	14.9	12.2	12.5	10.1	8.9	45.9
断面 5	39.8	15.9	13.8	15.3	7.6	5.6	51.5
断面 6	37.1	19.5	16.1	14.5	7.3	5.5	55.4
断面 7	40.3	19.1	14.6	12.8	5.9	7.3	61.0
断面 8	39.1	19.7	16.0	13.3	8.3	4.6	47.6
断面 9	35.8	17.1	13.0	16.4	9.9	7.8	54.1
断面 10	39.6	20.2	13.7	11.9	6.1	8.5	58.9

表 2 各部开挖引起的 CRD4 拱顶下沉量
Tab.2 Subsidence of CRD4 caused by excavation of each step

开挖部位	$\eta/\%$						$\Delta_{\text{tot}}/\text{mm}$
	CRD1	CRD2	CRD3	CRD4	CRD5	CRD6	
断面 1	—	—	—	55.1	24.4	20.5	31.9
断面 2	—	—	—	51.9	24.7	23.4	26.1
断面 3	—	—	—	53.2	24.1	22.7	30.6
断面 4	—	—	—	59.4	20.9	19.7	33.7
断面 5	—	—	—	57.3	22.6	20.1	37.2
断面 6	—	—	—	62.1	23.6	14.3	41.5
断面 7	—	—	—	54.9	23.9	21.2	33.9
断面 8	—	—	—	59.4	21.3	19.3	38.2
断面 9	—	—	—	55.6	22.9	21.5	40.5
断面 10	—	—	—	51.7	27.0	21.3	41.4

1.3 结构内力监测数据

初期支护轴力(F)、弯矩(M)是通过实测钢筋应力推算得到的. 实际监测中用钢筋计对初期钢进行监测,钢筋计成对焊接在型钢的腹板上靠近外翼缘的地方. 通过钢筋计测得的应力,可以求出钢筋应变. 根据共同变形原则和平截面假定,即可得到混凝土内外翼缘的应变,进而推算出混凝土的受力,断面的轴力即为混凝土与钢筋的受力之和. 图 3 为开挖步骤,表 3 为实测的结构内力变化过程. 从图 3 可知: CRD1 部开挖产生的轴力约占最终轴力的 42%~49%,CRD2 部开挖轴力占最终轴力的 15%~22%,整

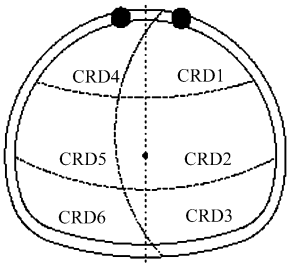


图 1 拱顶沉降观测点
Fig.1 Measuring point of vault settlement

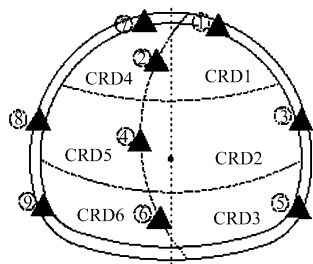


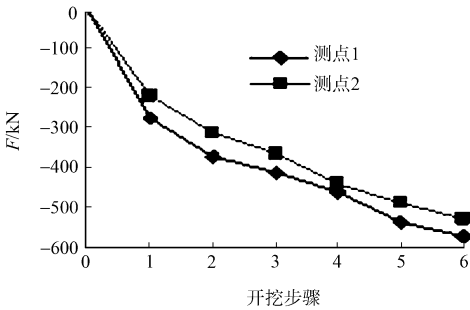
图 2 结构内力观测点
Fig.2 Measuring point of internal force

个开挖过程中结构的内力基本呈非线性增大趋势,满足规范^[9-10]的要求. 因此,结构应该是安全的.

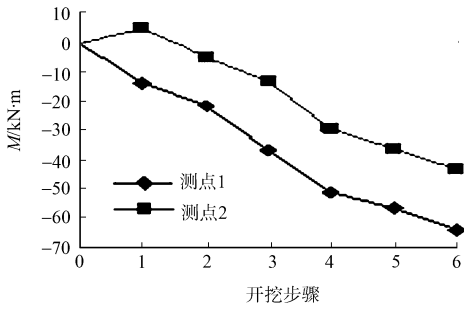
表 3 实测的结构内力变化

Tab. 3 Measured values of structural internal forces

测点	CRD1 开挖		CRD2 开挖		CRD3 开挖		CRD4 开挖		CRD5 开挖		CRD6 开挖	
	F/kN	M/kN·m	F/kN	M/kN·m	F/kN	M/kN·m	F/kN	M/kN·m	F/kN	M/kN·m	F/kN	M/kN·m
1	-267	-13.6	-373	-21.8	-414	-37.2	-462	-48.6	-539	-57.2	-557	-64.3
2	-212	3.7	-305	-6.1	-367	-14.3	-443	-25.5	-491	-36.7	-531	-43.3
3	—	—	-279	-8.3	-316	9.4	-407	39.7	-499	41.9	-576	52.6
4	—	—	-271	2.1	-329	5.9	-389	12.3	-465	7.2	-562	13.4
5	—	—	—	—	-322	-8.7	-396	-27.9	-486	-33.4	-577	-61.7
6	—	—	—	—	-309	-2.6	-391	10.5	-473	5.8	-559	8.7
7	—	—	—	—	—	—	-419	-33.8	-486	-44.7	-561	-54.5
8	—	—	—	—	—	—	—	—	-501	-6.8	-557	31.9
9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	-572	-48.4



(a) 轴力



(b) 弯矩

图 3 开挖步骤变化图

Fig. 3 Excavation steps

2 隧道施工的有限元模拟

2.1 模型的建立

建模依据的是监测断面的实际情况. 计算范围:上部至地表 15 m,下部至隧道仰拱以下 50 m,左右各取 50 m. 计算模型:长为 50 m,左右边界有水平约束,下部边界有垂直约束,地表为自由边界. 台阶长度为 15 m,单循环开挖进尺为 1.5 m. 采用实体 SOLID 45 单元模拟围岩、初期支护. 材料屈服模型采用 Mohr-Coulomb 准则,计算模型总单元数为 110 200 个,总节点数为 117 261 个. 图 4 为 CRD 法计算模型.

针对本工程两端都处于长距离的超浅埋软弱地层,结合现场施工变形较大的实际情况,采用 ANSYS 软件,对 CRD 法开挖、拆撑,以及施做初期支护全过程模拟计算,拟对 CRD 法安全快速的施工进行理论上指导.

2.2 计算参数的选取

根据勘察报告及相关设计规范等资料得出计算参数,如表 4 所示. 表 4 中: E 为弹性模量; μ 为泊松

表 4 采用的计算参数

Tab. 4 Calculation parameters

名称	E/MPa	μ	$\gamma/\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	C/MPa	$\phi/(^{\circ})$	h/m
砂质红粘土层	8.3	0.45	17.6	4.95	34	4.57
红粘土层	10.7	0.45	19.1	5.37	29	10.43
锚杆加固区	5.1	0.20	19.1	—	29	—
初期支护	34.5	0.17	23.0	—	—	—
临时支护	34.5	0.19	23.0	—	—	—

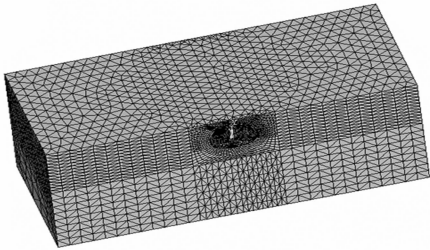


图 4 CRD 法计算模型

Fig. 4 Calculation model of CRD method

比; γ 为重度; C 黏聚力; ϕ 为内摩擦角; h 为厚度.

2.3 隧道施工过程的模拟

模拟开挖分 6 部分进行,开挖施工步骤为:1) 采用小导管注浆进行超前支护;2) 开挖第 1 部分,采用喷混凝土和打锚杆的方式沿仰拱进行初期支护,采用工字钢在中隔墙和仰拱处进行临时支护,闭合临时仰拱;3) 开挖第 2 部分,采用喷混凝土和打锚杆的方式沿洞周进行初期支护,采用工字钢在中隔墙和仰拱处进行临时支护,闭合临时仰拱;4) 开挖第 3 部分,采用喷混凝土方式在仰拱处进行初期支护,采用工字钢在中隔墙处进行临时支护,闭合仰拱;5) 以相同的工序开挖第 4,5,6 部分;6) 拆除临时支护.

2.4 沉降计算结果分析

数值模拟以下 3 种工况的拱顶沉降:1) 正常施工情况下的开挖;2) 基地弱化条件下的开挖;3) 基地弱化和各洞室完成闭合时间较长条件下的开挖.

不同施工工况拱顶沉降情况,如图 5 所示.

1) 从数值分析结果来看,工况 3 的沉降值远大于其他工况. 施工中仰拱闭合早晚对拱顶沉降起到决定性作用,尽快闭合仰拱对减小拱顶下沉有很大帮助,因此开挖后应加快仰拱闭合.

2) 不论何种工况,CRD1 的开挖对本部拱顶下沉的影响最大,其量值约为最终预测拱顶下沉值的 32%~36%. 这和现场观测结果有一定出入,主要是因为 CRD1 施工难度大,控制因素较多,如超前支护的注浆效果、施工排水的及时性、工序转换的及时性、土层的复杂性等,而这些因素在数值模拟中较难真实地被反映.

2.5 内力计算结果分析

在施工模拟的过程中,先开挖的右侧轴力大于后开挖的左侧轴力,最高可达到 521 kN. 临时支护和初期支护都受到了不同程度的弯矩,开挖右侧时,最大弯矩出现在右侧拱顶处,最大值可达到 -39.4 kN·m;开挖左侧时,最大弯矩出现在左侧拱顶处,最大值可达到 -56.9 kN·m. 由整个开挖模拟过程中的拱顶变形和拱顶内力发展规律不难发现,开挖后期拱顶内力变化速率明显变缓,而变形持续增大,说明土体应力超过其屈服极限,拱顶土体已进入塑性变形阶段,在施工中应引起注意.

数值计算的结构内力变化,如表 5 所示. 从表 5 可知:在整个开挖过程中,结构的内力呈增大趋势,与实测结果基本吻合.

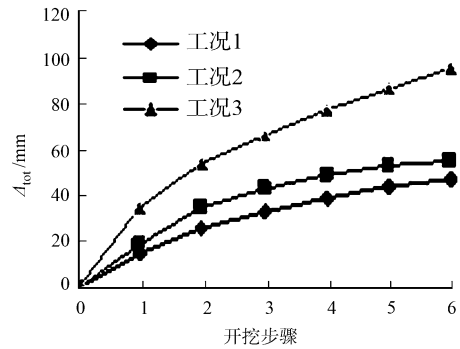


图 5 不同工况下拱顶下沉
Fig. 5 Subsidence under different conditions

表 5 数值计算的结构内力变化

Tab. 5 Numerical simulation results of structural internal forces

测点	CRD1 开挖		CRD2 开挖		CRD3 开挖		CRD4 开挖		CRD5 开挖		CRD6 开挖	
	F/kN	M/kN·m	F/kN	M/kN·m	F/kN	M/kN·m	F/kN	M/kN·m	F/kN	M/kN·m	F/kN	M/kN·m
1	-208	-15.8	-326	-26.7	-393	-38.3	-453	-44.9	-487	-52.8	-496	-53.5
2	-207	5.3	-319	-7.9	-379	-19.1	-426	-27.2	-455	-33.9	-497	-38.1
3	—	—	-288	-8.9	-349	9.9	-401	31.7	-459	40.7	-503	51.3
4	—	—	-211	2.7	-265	7.2	-324	7.4	-391	11.9	-473	12.8
5	—	—	—	—	-287	-9.4	-350	-29.1	-433	-35.2	-507	-43.1
6	—	—	—	—	-264	-3.8	-337	2.6	-411	5.3	-498	9.3
7	—	—	—	—	—	—	-368	-34.1	-432	-45.6	-491	-55.2
8	—	—	—	—	—	—	—	—	-461	-7.9	-475	28.7
9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	-479	-50.1

3 结论

数值模拟及现场测量结果表明:CRD1 开挖产生的拱顶沉降约占整体沉降的比例的 36%,拱顶下沉曲线通常为最后趋于收敛的非线性上升曲线,施工中仰拱闭合早晚对拱顶沉降起到决定性作用,应尽快

闭合仰拱以减小拱顶下沉。

整个开挖过程中,最大弯矩出现在拱顶,先开挖右侧的轴力大于后开挖的左侧,在施工中应引起重视。数值计算结果与监测结果部分数据存有差异,这可能是由于施工过程模拟理想化、计算参数选取与实际情况有出入所致,但两者间数据变化趋势较为一致。因此,通过对施工过程的动态模拟,预先掌握施工过程中沉降和结构内力的变化规律,以期对隧道施工提出有针对性的意见和建议。

参考文献:

[1] 郭春,俞尚宇,王明年. CRD 法开挖对海底隧道结构内力及安全系数影响[J]. 水文地质工程地质,2009,36(1):75-79.

[2] 张建国,王明年,俞尚宇. 厦门东通道 CRD 法施工段中隔壁安全性分析[J]. 公路,2008,33(3):207-211.

[3] 薛富春,马建林,颜利平. 超大断面黄土隧道 CRD 法开挖的三维有限元分析[J]. 铁道建筑,2010,50(5):31-33.

[4] 郭衍敬,黄明琦,陈铁林. 厦门翔安海底隧道 CRD 法和双侧壁法穿越砂层对比分析[J]. 中国铁道科学,2009,6(3):54-59.

[5] 黄明琦,付贤伦,李云超. 大断面海底隧道软弱地层 CRD 法施工稳定性控制研究[J]. C 岩石力学与工程学报,2007,26(S2):3804-3809.

[6] 王毓华. 中国红粘土特征及建筑地基工程处理方法[J]. 西部探矿工程,1996,8(4):6-7.

[7] 薛守义,卞富宗. 红土的结构与工程特性[J]. 岩土工程学报,1987,9(3):92-104.

[8] 韦复才,唐健生. 我国红土工程地质研究新进展及今后主要研究方向[J]. 矿产与地产,2005,25(5):568-572.

[9] 中华人民共和国行业标准编写组. TB10204—2002, J163—2002 铁路隧道施工规范[S]. 北京:中国铁道出版社,2002.

[10] 中华人民共和国行业标准编写组. TB10108—2002, J159—2002 铁路隧道喷锚构筑法技术规范[S]. 北京:中国铁道出版社,2003.

Study of Subsidence and Structural Internal Force of
Tunnel Excavation in Red Clay by CRD Method

ZHANG Ding-bang¹, ZHU Jin-feng²

(1. School of Civil Engineering, Hubei Polytechnic University, Huangshi 435003, China;
2. Zibo City Highway Administration Bureau, Zibo 255038, China)

Abstract: A double-track railway tunnel in laterite was constructed by center cross diaphragm (CRD) method. Based on both the tested in-situ data and numerical results by ANSYS software, the variation of vault subsidence, bending moment and axial force during the excavation was studied. The results show that the vault settlement caused by excavation section 1 is about 36% of whole subsidence, and the axial force caused by excavation section 1 is about 42%~49% of the final axial force, the vaults subsidence increases and converges finally with time. During excavation, the axial force increases nonlinearly.

Keywords: center cross diagram method; vault subsidence; laterite; axial force; bending moment

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 方德平)