

# 海底隧道浅埋暗挖段 CRD 法不同施工工序比较

张建国, 王明年, 刘大刚, 魏龙海, 俞尚宇

(西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031)

**摘要:** 在建工程厦门东通道(翔安)海底隧道是我国大陆地区第一座海底隧道, 陆域浅埋暗挖段地质条件较差, 多为全、强风化花岗岩, 且含水量高、强度低, 因而采用 CRD 法施工, 该施工段围岩条件差、结构跨度大, 且国外相同工程条件下可借鉴的经验也较少。据此, 对该施工段采用现场监控和数值模拟 2 种手段, 分析了不同施工工序各部开挖对拱顶下沉、水平收敛及结构内力的影响, 2 种方法所得结果吻合良好。研究表明, 在此特定隧道围岩条件下, CRD1, 2 超前与 CRD1, 3 超前相比, 各施工部的开挖引起拱顶下沉量的比例基本相同, 但前者所引起的 CRD1, 3 拱顶下沉量分别高出后者约 70%, 45%, 而 CRD1 的绝对收敛值约大于后者 15%, 结构内力也略大于后者。以上研究成果为隧道的信息化施工提供了依据, 也为今后的相关工程积累了经验。

**关键词:** 海底隧道; 浅埋暗挖; 现场监测; 数值模拟; 施工工序; 信息化施工

**中图分类号:** U 459.5; O 241

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2007)增 2 - 3639 - 07

## COMPARISON OF DIFFERENT WORKING PROCEDURES BY CRD METHOD FOR SHALLOW-BURIED SUBSEA TUNNEL EXCAVATION

ZHANG Jianguo, WANG Mingnian, LIU Dagang, WEI Longhai, YU Shangyu

(School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

**Abstract:** Xiamen East Passageway Xiang'an subsea tunnel under construction is the first subsea tunnel in China. CRD method is adopted for the unfavourable geological conditions on shallow-buried excavation area through strong weathered granite, which holds higher water content and lower intensity. Due to the unfavourable geological conditions and no experiences referred to foreign similar projects, the method of combining in-situ monitoring with numerical simulation is employed to analyze the influence of different working procedures of settlements with convergence and internal forces of arch crown. The achieved results agree well with the analytical result. The research indicates that the proportion of settlement of arch crown by different steps is basically the same by the comparison between CRD1, 2 excavation ahead and CRD1, 3 on the geological conditions specifically, but settlement of arch crown on CRD1, 3 by the first working procedure is approximately 70%, 45% higher than the second one while convergence on CRD1 is about 15%. In addition, internal forces are a little higher than those of the second working procedure. The result can provide references to the information-oriented construction of tunnel as well as experience for similar projects.

**Key words:** subsea tunnel; shallow-buried excavation; in-situ monitoring; numerical simulation; working procedure; information-oriented construction

**收稿日期:** 2007 - 06 - 17; **修回日期:** 2007 - 07 - 19

**基金项目:** 国家高技术研究发展计划(863)资助项目(2006AA11Z116)

**作者简介:** 张建国(1981 -), 男, 2004 年毕业于西南交通大学土木工程学院, 现为博士研究生, 主要从事地下工程方面的研究工作。E-mail: jgzhang0508@163.com

# 1 引言

正在修建的厦门东通道(翔安)海底隧道, 起点位于厦门岛下边村南侧, 接大陆岸连接线, 与福厦高速公路连接, 兼具公路和城市道路的双重功能, 建成后, 将成为我国大陆地区第 1 条海底公路隧道。设计采用三孔隧道方案, 两侧为行车主洞各设置 3 车道, 中孔为服务隧道, 其中单条隧道毛洞跨径为 14.674 m, 高 9.85 m, 隧道两端陆域段多为全、强风化花岗岩, 地质条件较差, 采用 CRD 法施工<sup>[1]</sup>。

对于采用 CRD 法等多部开挖方法修建的隧道, 视其所处地质条件的不同, 施工过程中存在不同施工工序的问题。马天文等<sup>[2, 3]</sup>通过对南京地铁一号线南京站~东井亭区间渡线段隧道和宝兰二线新曲儿岔隧道的现场施工分析认为, CRD1, 2 超前的施工工序是可行的。刘惠敏等<sup>[4]</sup>通过北京地铁 10 号线光华路站侧洞的三维数值分析也表明, 在该工序条件下, 初期支护内力和地表沉降都较 CRD1, 3 超前时小。王刚等<sup>[5, 6]</sup>分别对洋碰隧道通过现场监控量测和数值模拟的手段进行了分析, 结果表明 CRD1, 3 超前要较好。

本文主要就厦门东通道(翔安)海底隧道陆域段 CRD 法不同施工工序条件下, 对各部开挖引起拱顶下沉、水平收敛及结构内力的现场监控量测数据与数值仿真模拟结果进行对比研究, 以此分析适合于该地质条件的合理施工工序。

## 2 现场监控量测

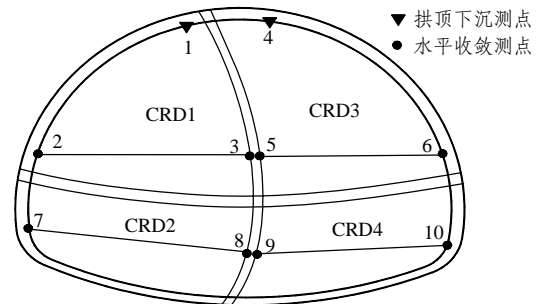
### 2.1 测点的布设

对于隧道监控量测而言, 拱顶下沉与周边位移量测是反映隧道结构安全性的最直接方式<sup>[7]</sup>。因此, 厦门东通道施工监测主要采用这 2 种方法, 并辅以振弦式钢筋计对隧道初期支护及临时支护进行应力监测, 监测断面的间距按有关规范<sup>[8]</sup>及合同要求确定。测点布设见图 1。

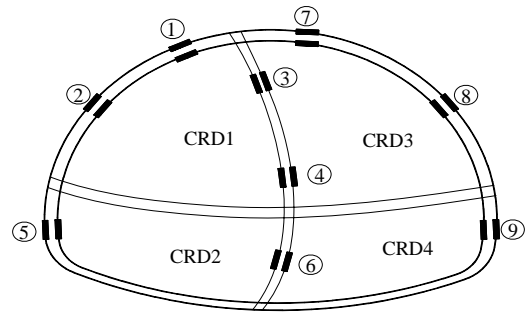
### 2.2 量测结果与分析

#### (1) 拱顶下沉量测

从 CRD1 实测拱顶下沉曲线可知(见图 2): 该曲线呈台阶状上升, 而每个台阶的开始时间(曲线的反弯点)和施工部的开挖进度有一定的联系, 因此, CRD1, 3 拱顶下沉不仅受本部开挖的影响, 其他施工部的开挖对其也有一定影响, 对 2 种施工工序各



(a) 位移量测布置图



(b) 应力量测布置图

图 1 测点布设示意图

Fig.1 Distribution of measuring points

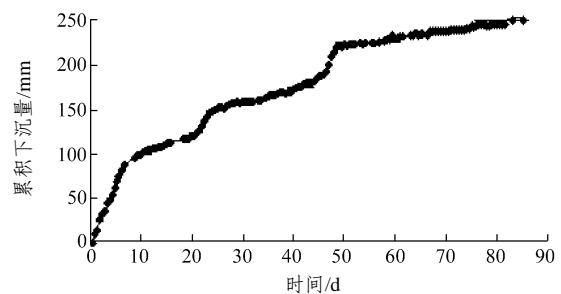


图 2 CRD1 实测拱顶下沉时态曲线

Fig.2 Curve of measured settlement of arch crown of CRD1

8 个位移断面各施工部开挖引起 CRD1, 3 拱顶下沉的量测结果进行了统计, 见表 1。

由表 1 可以看出: 虽然 2 种施工工序各施工部引起 CRD1, 3 拱顶下沉量的比例相差不大, 但其量值却相差很大, CRD1, 2 超前时的拱顶下沉量明显高于 CRD1, 3 超前时的拱顶下沉量; 前者 CRD1, 3 拱顶下沉量比后者分别高出约 70%, 45%, 具体数据见表 2。

#### (2) 水平收敛量测

由于水平收敛量测开始时 CRD1 临时仰拱已经闭合, 所以 CRD1 水平收敛数据从掌子面开挖到临时仰拱的闭合无法测得, 所以在下一施工部到达前的水平收敛量测数据很小。由于 CRD2, 4 水平收

表 1 2 种施工工序各部开挖引起 CRD1, 3 拱顶下沉量

Table 1 Settlements of arch crown of CRD1, 3 with different steps by two different working procedures

开挖 工序 编 号	各部开挖引起 CRD1 拱 顶下沉量占总沉降百分 比/%				总下 沉值 /mm	各部开挖引起 CRD3 拱 顶下沉量占总沉降百分 比/%				总下 沉值 /mm	
	CRD1	CRD2	CRD3	CRD4		CRD1	CRD2	CRD3	CRD4		
CRD1, 3 超前	1	50.1	20.2	14.5	15.2	259.3	-	20.9	59.8	19.3	155.8
	2	47.9	14.9	12.0	25.2	110.5	-	30.4	55.2	14.4	95.4
	3	46.7	17.1	19.3	16.9	117.8	-	22.3	61.2	16.5	105.1
	4	45.7	21.3	11.6	21.4	188.0	-	25.5	49.7	24.8	121.2
	5	49.2	22.8	10.8	17.2	200.0	-	22.3	60.6	17.1	141.4
	6	47.9	25.3	12.8	14.0	222.0	-	23.6	51.4	25.0	149.3
	7	45.8	18.6	17.0	18.6	288.0	-	25.5	58.8	15.7	162.0
	8	51.1	19.8	15.0	14.1	134.3	-	26.4	58.7	14.9	112.0
CRD1, 2 超前	1	46.5	23.3	16.9	13.3	262.7	-	-	55.1	44.9	146.1
	2	50.2	25.4	13.5	10.9	245.3	-	-	64.4	35.6	116.6
	3	52.2	27.1	10.5	10.2	297.0	-	-	54.3	45.7	222.3
	4	54.8	21.9	11.6	11.7	297.0	-	-	60.7	39.3	206.7
	5	51.4	25.4	11.7	11.5	409.6	-	-	59.1	40.9	234.5
	6	55.3	19.8	14.7	10.2	475.7	-	-	56.8	43.2	251.2
	7	48.6	23.2	13.4	14.8	418.7	-	-	62.3	37.7	235.5
	8	44.2	22.2	18.1	15.5	214.5	-	-	57.5	42.5	98.4

注: 表中“-”处为开挖至监测断面时该开挖部已过。

表 2 2 种施工工序引起拱顶下沉量的对比

Table 2 Comparison of settlements of arch crown by two different working procedures

施工 部	CRD1, 3 超前		CRD1, 2 超前	
	引起 CRD1 拱 顶比例/%	引起 CRD3 拱 顶比例/%	引起 CRD1 拱 顶比例/%	引起 CRD3 拱 顶比例/%
CRD1	45~50	-	45~55	-
CRD2	15~25	20~30	20~30	-
CRD3	10~20	50~60	10~20	55~65
CRD4	15~25	15~25	10~15	35~45

敛实测值很小<sup>[9]</sup>, 因此, 只对上部水平收敛值进行分析。

从 CRD1 实测水平收敛曲线可知(见图 3), 2 种不同的施工工序呈现 2 种截然不同的收敛趋势, 但其绝对值的收敛趋势是相同的, CRD1 的水平收敛不仅受本部开挖的影响, 其他施工部的开挖对其水平收敛也有一定的影响, 对 2 种施工工序各 6 个位移断面各施工部开挖引起 CRD1 水平收敛的量测结

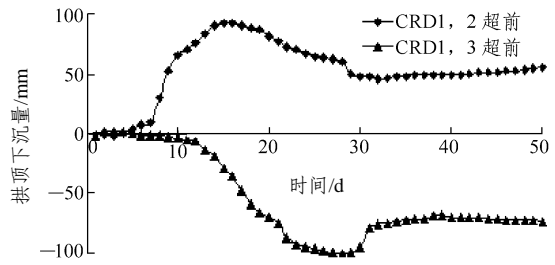


图 3 CRD1 实测水平收敛时态曲线

Fig.3 Curve of measured convergence on CRD1

果进行了统计, 如表 3 所示。

表 3 2 种施工工序各部开挖引起 CRD1 水平收敛变化值

Table 3 Convergence on CRD1 with different steps by two different working procedures

开挖 工序	断面 编号	各部开挖引起的 CRD1 水平收敛变化值/mm			
		CRD1	CRD2	CRD3	CRD4
CRD1, 3 超前	1	-	-44.8	-20.9	-2.30
	2	-	-45.1	-27.4	-4.90
	3	-	-40.5	-30.8	-0.90
	4	-	-53.6	-25.7	4.50
	5	-	-45.6	-30.9	-7.50
	6	-	-30.7	-40.8	2.40
CRD1, 2 超前	1	-	132.9	-19.1	-26.30
	2	-	89.6	23.0	-23.20
	3	-	122.1	-10.4	-10.80
	4	-	88.6	20.9	-24.70
	5	-	102.5	-6.3	-24.20
	6	-	80.7	34.6	-30.10

注: 表中正值代表水平收敛, 负值代表水平扩张。

由图 3 及表 3 可知, 2 种开挖形式的水平收敛总趋势是完全相反的, CRD1, 3 超前时实测值先扩张后略有收敛, 而 CRD1, 2 超前时实测值则先收敛后略有扩张, 但其绝对值的收敛趋势是相同的; CRD1, 2 超前开挖时水平收敛值的绝对值高出 CRD1, 3 超前时约 15%, 具体数据见表 4。

表 4 2 种施工工序引起水平收敛量的对比

Table 4 Comparison of convergence by two different working procedures mm

CRD1, 3 超前	CRD1, 2 超前
-74.3	86.6

(3) 应力量测

对 2 种施工工序各 2 个应力断面各施工部开挖引起图 1(b)中各测点内力的量测结果进行了统计, 其平均值见表 5, 6, 安全系数随开挖部的变化如图 4, 5 所示。由表 5, 6 及图 4, 5 可知, CRD1, 2 超前开挖时的结构内力要略大于 CRD1, 3 超前开挖时的结果, CRD3 的开挖对结构内力的影响较大; 整个开挖过程中结构的内力基本呈增大趋势, 但安全系数仍满足规范<sup>[10]</sup>要求, 结构应该是安全的。

### 3 隧道施工数值模拟

为了从理论上论证现场监控量测结果的准确性, 进一步深入研究 2 种施工工序的不同, 以下将

根据实际开挖步骤, 利用三维有限差分程序 FLAC<sup>3D</sup>, 对隧道施工全过程采用 Mohr-Coulomb 准则进行动态模拟。

#### 3.1 模型的建立

在有限元计算中, 边界约束条件对计算结果影响较大, 根据徐干成等<sup>[11~13]</sup>的研究, 本次计算范围选取为: 上部取至地表(15 m), 左右部及下部边界取至离隧道外缘周边约 50 m, 模型长 60 m; 左右为水平约束边界, 下部为垂直约束边界, 地表为自由边界; 每施工部台阶长度为 12 m, 每次进尺 1.5 m, 研究断面取在距前边界 20 m 处。计算中用八节点六面体实体单元模拟围岩、初期支护及临时支护。计算模型总单元数为 140 300 个, 总节点数为 148 461 个。计算模型网格图如图 6 所示。

表 5 CRD1, 3 超前各部开挖引起内力及安全系数变化值

Table 5 Internal forces and safety factors with different steps for CRD1, 3 excavation ahead

测点	CRD1 开挖			CRD3 开挖			CRD2 开挖			CRD4 开挖		
	轴力/kN	弯矩/(kN·m)	安全系数	轴力/kN	弯矩/(kN·m)	安全系数	轴力/kN	弯矩/(kN·m)	安全系数	轴力/kN	弯矩/(kN·m)	安全系数
1	-447	-10.6	10.2	-747	-17.1	6.1	-845	-19.5	5.4	-896.5	-21.6	5.1
2	-400	2.4	11.5	-705	6.7	6.5	-806	-0.3	5.7	-805.0	-6.0	5.7
3	-439	-7.4	7.9	-742	8.3	4.7	-832	15.7	4.2	-886.0	20.6	3.9
4	-417	3.2	8.2	-722	5.2	4.7	-809	6.9	4.2	-844.5	13.9	4.0
5	-	-	-	-	-	-	-593	7.8	7.8	-978.5	19.8	4.7
6	-	-	-	-	-	-	-509	6.5	6.5	-809.0	6.1	4.1
7	-	-	-	-646	-11.7	7.0	-733	-16.2	6.1	-910.0	-18.7	5.0
8	-	-	-	-623	0.5	7.3	-705	3.1	6.4	-865.5	2.9	5.2
9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-936.5	16.8	4.8

表 6 CRD1, 2 超前各部开挖引起内力及安全系数变化值

Table 6 Internal forces and safety factors with different steps for CRD1, 2 excavation ahead

测点	CRD1 开挖			CRD2 开挖			CRD3 开挖			CRD4 开挖		
	轴力/kN	弯矩/(kN·m)	安全系数	轴力/kN	弯矩/(kN·m)	安全系数	轴力/kN	弯矩/(kN·m)	安全系数	轴力/kN	弯矩/(kN·m)	安全系数
1	-458	-10.8	9.9	-579	-13.5	7.9	-868	-21.6	5.2	-947	-25.7	4.8
2	-436	2.1	10.2	-570	-0.6	7.8	-815	-6.9	5.4	-945	-14.8	4.9
3	-431	-5.9	8.0	-545	-8.9	6.4	-812	-10.1	4.3	-1 065	-4.0	3.2
4	-449	2.1	7.6	-566	7.8	6.0	-821	4.9	4.2	-886	5.5	3.8
5	-	-	-	-492	9.6	9.4	-841	15.6	5.5	-1 111	17.1	4.2
6	-	-	-	-443	7.4	7.5	-732	10.0	4.5	-811	5.9	4.0
7	-	-	-	-	-	-	-675	17.7	6.7	-890	-22.4	5.1
8	-	-	-	-	-	-	-771	5.3	5.9	-926	-3.9	4.9
9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-994	15.0	4.5

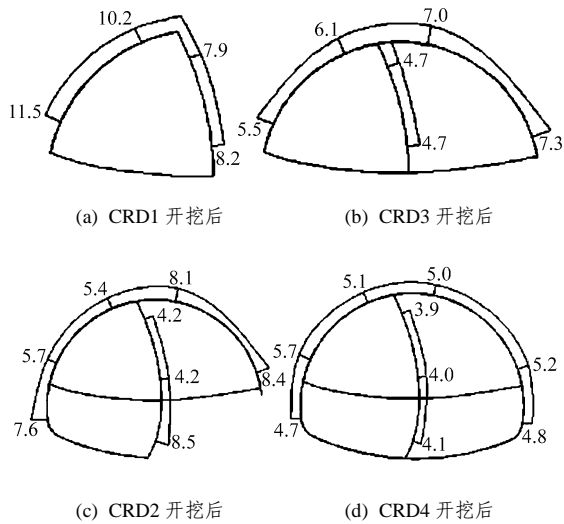


图 4 CRD1, 3 超前安全系数图

Fig.4 Safety factors for CRD1, 3 excavation ahead

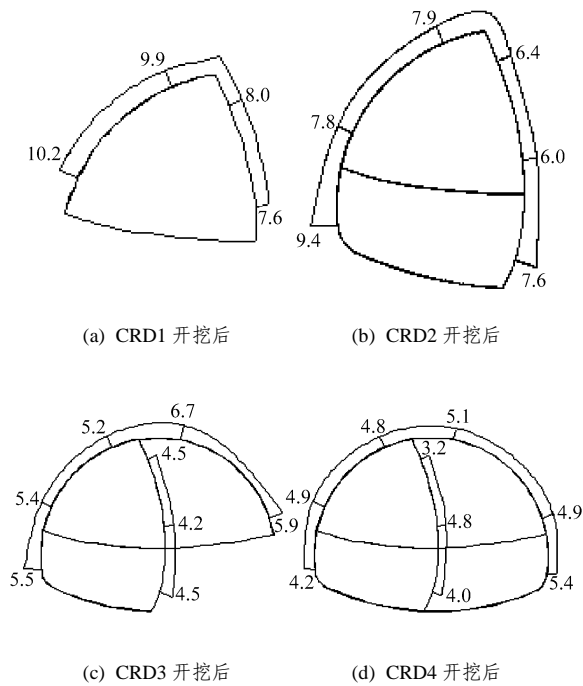


图 5 CRD1, 2 超前安全系数图

Fig.5 Safety factors for CRD1, 2 excavation ahead

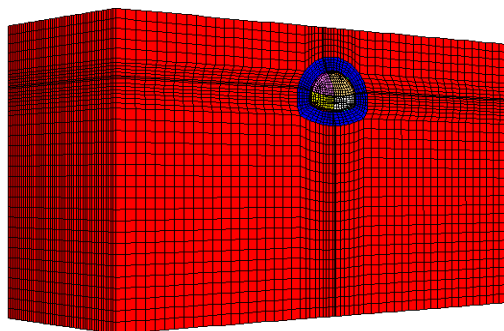


图 6 有限元网格图

Fig.6 Finite element meshes for calculation

计算模型中, 对锚杆加固的土体围岩, 按经验采取提高其  $c$ ,  $\phi$  值来加以仿真模拟<sup>[14, 15]</sup>, 围岩及支护材料的物理力学参数取值如表 7 所示。

表 7 围岩及支护体系物理力学参数

Table 7 Physico-mechanical parameters of the materials

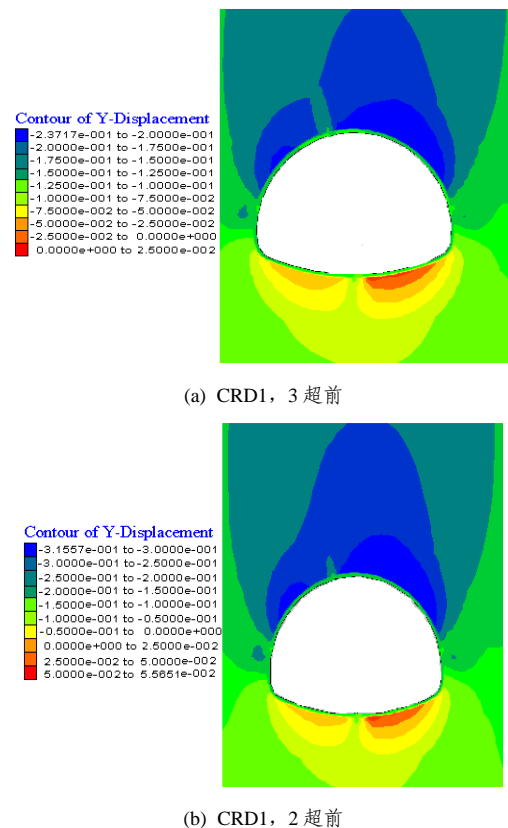
材料类型	弹性模量 $E/\text{MPa}$	泊松比 $\nu$	黏聚力 $c/\text{MPa}$	内摩擦角 $/(\text{°})$	密度 $/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
V 级围岩	200	0.45	0.05	20	1900
锚杆加固区	250	0.45	0.06	20	1900
初期支护	29 500	0.20			2 500
临时支护	29 500	0.20			2 500

### 3.2 动态施工模拟

利用上述有限元模型, 对 CRD1, 3 超前与 CRD1, 2 超前 2 种施工工序进行有限元动态施工模拟。

#### (1) 位移计算结果

2 种施工工序的围岩竖向位移云图如图 7 所示; 位移计算结果见表 8。从计算结果可以看出, 2 种不同的施工工序 CRD3 拱顶下沉值都大于 CRD1 拱顶



(a) CRD1, 3 超前

(b) CRD1, 2 超前

图 7 围岩竖向位移场(单位: m)

Fig.7 Vertical displacement fields of surrounding rock mass(unit: m)

表 8 位移计算结果

Table 8 Results of displacement calculated with numerical method

项目	开挖部	CRD1, 3 超前		CRD1, 2 超前	
		下沉值 /mm	占总下沉量比例 /%	下沉值 /mm	占总下沉量比例 /%
各部开挖引起 CRD1 拱顶下沉量	CRD1	97.6	49.1	167.4	58.7
	CRD2	47.1	23.7	66.1	23.2
	CRD3	20.9	10.5	35.9	12.6
	CRD4	33.2	16.7	15.7	5.5
合计	198.8	100.0	285.1	100.0	
项目	开挖部	CRD1, 3 超前		CRD1, 2 超前	
		下沉值 /mm	占总下沉量比例 /%	下沉值 /mm	占总下沉量比例 /%
各部开挖引起 CRD3 拱顶下沉量	CRD1	-	-	-	-
	CRD2	57.9	26.1	-	-
	CRD3	127.3	57.4	219.7	71.4
	CRD4	36.6	16.5	88.0	28.6
合计	221.7	100.0	307.7	100.0	

下沉值，这是由于在现场量测中没有考虑 CRD1 施工对 CRD3 拱顶下沉的影响，但各部开挖引起拱顶下沉量的比例与实测结果大致相同；2 种施工工序对水平收敛影响的数值计算结果相差不大。

(2) 安全系数计算结果

将 2 种施工工序的结构计算安全系数随开挖部的变化绘制如图 8, 9 所示。

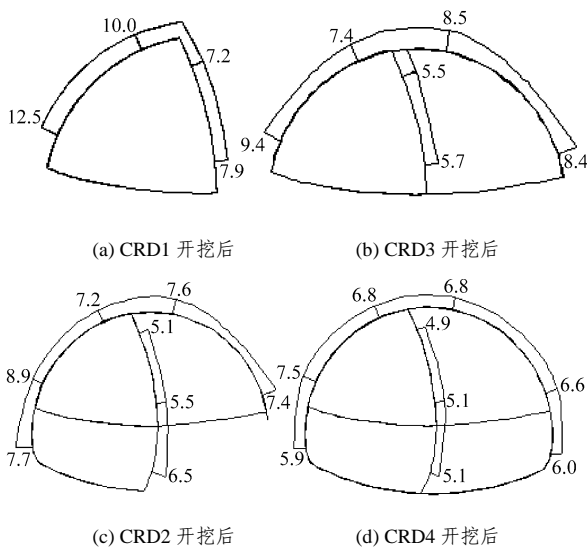


图 8 CRD1, 3 超前安全系数图

Fig.8 Safety factors for CRD1, 3 excavation ahead

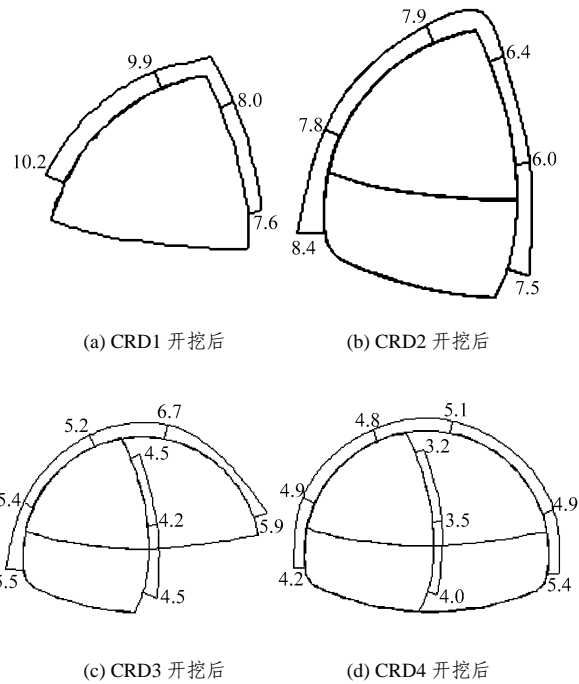


图 9 CRD1, 2 超前安全系数图

Fig.9 Safety factors for CRD1, 2 excavation ahead

由图 8, 9 可知，在 2 种施工工序的整个开挖过程中结构的内力呈增大趋势，与实测结果相吻合，且安全系数满足规范<sup>[10]</sup>要求。

### 4 结 论

通过对 2 种施工工序结构位移与内力的动态监测与数值模拟，得到以下几点结论，相信能为大跨度隧道的安全施工提供一定的依据。

(1) 拱顶下沉量测数据呈台阶式增长，说明每一部的开挖对其都有一定的影响。CRD1, 2 超前时所引起的 CRD1, 3 拱顶下沉量比 CRD1, 3 超前时的量测结果分别高出约 70%，45%。

(2) 2 种施工工序的 CRD1 水平收敛趋势是完全相反的，但其绝对值的收敛趋势是相同的，而 CRD1, 2 超前时的量测结果比 CRD1, 3 超前时高出约 15%。

(3) 采用 CRD1, 2 超前的施工方式所产生的结构内力要略大于采用 CRD1, 3 超前时的结果。

(4) 计算结果与监测结果吻合良好，因此可以通过对施工过程的动态模拟预先掌握施工过程中结构的变形规律，这也说明采用现场监测与数值模拟相结合的方法对指导隧道的信息化施工是有效的。

## 参考文献(References):

- [1] 施仲衡. 地下铁道设计与施工[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1997.(SHI Zhongheng. Subway tunnel design and construction[M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1997.(in Chinese))
- [2] 马天文. 南京地铁南京站~东井亭区间渡线段隧道施工技术[J]. 现代隧道技术, 2003, 40(2): 25 - 27.(MA Tianwen. Construction of connecting tunnel between Nanjing station and Dongjingting in Nanjing metro[J]. Modern Tunnelling Technology, 2003, 40(2): 25 - 27.(in Chinese))
- [3] 赵源林, 姜玉松. 既有铁路路基下软岩隧道的 CRD 法施工技术[J]. 安徽理工大学学报(自然科学版), 2005, 25(2): 29 - 34.(ZHAO Yuanlin, JIANG Yusong. Construction technology of soft rock tunnel by CRD method under the bed of existing railway[J]. Journal of Anhui University of Science and Technology(Natural Science), 2005, 25(2): 29 - 34.(in Chinese))
- [4] 刘慧敏, 赵月, 吴波. CRD 法不同施工工序的比较与分析[J]. 隧道建设, 2005, 25(5): 6 - 14.(LIU Huimin, ZHAO Yue, WU Bo. Comparison of and analysis on different working procedures of CRD method[J]. Tunnel Construction, 2005, 25(5): 6 - 14.(in Chinese))
- [5] 王刚. 不良地层大断面隧道施工技术[J]. 隧道建设, 2001, 21(2): 7 - 10.(WANG Gang. Construction technology of tunnels with large sections on unfavorable geological conditions[J]. Tunnel Construction, 2001, 21(2): 7 - 10.(in Chinese))
- [6] 徐林生, 孙钧, 蒋树屏. 洋碰隧道 CRD 工法施工过程的动态仿真数值模拟研究[J]. 地质灾害与环境保护, 2001, 12(1): 58 - 67.(XU Linsheng, SUN Jun, JIANG Shuping. Numerical simulation of dynamic emulation on CRD construction process in Yangpeng tunnel[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2001, 12(1): 58 - 67.(in Chinese))
- [7] 黄成光. 公路隧道施工[M]. 北京: 人民交通出版社, 2002.(HUANG Chengguang. Construction of highway tunnel[M]. Beijing: China Communications Press, 2002.(in Chinese))
- [8] 中华人民共和国行业标准编写组. JTJ042 - 94 公路隧道施工技术规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 1995.(The Professional Standards Compile Group of People's Republic of China. JTJ042 - 94 Technical specifications for construction of highway tunnel[S]. Beijing: China Communications Press, 1995.(in Chinese))
- [9] 俞尚宇. 厦门东通道大断面海底隧道陆域段施工安全评价[学位论文][D]. 成都: 西南交通大学, 2006.(YU Shangyu. Study on construction security evaluation of subsea tunnel with large cross-section[M. S. Thesis][D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2006.(in Chinese))
- [10] 中华人民共和国行业标准编写组. JTG D70 - 2004 公路隧道设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.(The Professional Standards Compile Group of People's Republic of China. JTG D70 - 2004 Code for design of road tunnel[S]. Beijing: China Communications Press, 2004.(in Chinese))
- [11] 徐干成, 白洪才, 郑颖人, 等. 地下工程支护结构[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002.(XU Gancheng, BAI Hongcai, ZHENG Yingren, et al. Support structure of underground engineering[M]. Beijing: China Water Power Press, 2002.(in Chinese))
- [12] 李志业, 曾艳华. 地下结构设计原理与方法[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2003.(LI Zhiye, ZENG Yanhua. Design theory and method of underground structure[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2003.(in Chinese))
- [13] 潘昌实. 隧道力学数值方法[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1995.(PAN Changshi. Numerical method of tunnel mechanics[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1995.(in Chinese))
- [14] 李强, 王明年, 李玉文. 双跨连拱隧道 2 种中墙的空间力学效应分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(4): 667 - 672.(LI Qiang, WANG Mingnian, LI Yuwen. Three-dimensional mechanical effect analysis of two types of midboard for double span-arch-connecting tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(4): 667 - 672.(in Chinese))
- [15] 朱合华, 丁文其. 地下结构施工过程的动态仿真模拟分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(5): 558 - 562.(ZHU Hehua, DING Wenqi. The construction process simulation of underground structure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(5): 558 - 562.(in Chinese))