

厦门翔安海底隧道陆域段 CRD 法位移监测分析

张建斌^{1, 2}

(1. 河海大学 水利水运学院, 江苏 南京 210098; 2. 厦门路桥建设集团有限公司, 福建 厦门 361026)

摘要: 厦门翔安海底隧道陆域段为软弱地层三车道大断面浅埋暗挖隧道, 主要采用交叉中隔壁(CRD)法施工, 结合现场施工情况对该隧道 CRD 法位移监测量测结果进行研究。研究表明, 该隧道 CRD 法施工监测量测判断指标应以拱顶下沉为主, 水平收敛为辅; 拱顶下沉通常为最后收于一稳定值的台阶状上升曲线, 各分部开挖引起的拱顶下沉增量呈一定比例关系, 可用于对最终拱顶下沉量的预测和控制时机参考, 施工中应重点控制引起约占总下沉量一半的 CRD1 初期支护尽早封闭; 该隧道陆域段 CRD 法施工中 CRD1 最终拱顶下沉控制标为 200 mm 比较合适。综合位移监测分析和现场施工经验认为, 翔安隧道陆域段 CRD 法相邻导坑掌子面间距控制为 10~15 m, 每循环开挖 1.0~1.5 m(极软弱地段只允许开挖 0.5 m)后立即支护, 导坑内台阶长度控制在 6 m 以内, 及时封闭仰拱, 对控制最终拱顶下沉和保证支护结构稳定性成效良好, 对隧道后续施工控制具有很好的指导意义。

关键词: 海底隧道; 开挖; 交叉中隔壁(CRD)法; 位移监测; 拱顶下沉

中图分类号: U 459.5

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2007)增 2 - 3653 - 06

DISPLACEMENT MONITORING ANALYSIS OF XIAMEN XIANG'AN SUBSEA TUNNEL IN LANDSIDE SECTION CONSTRUCTED WITH CRD METHOD

ZHANG Jianbin^{1, 2}

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China;

2. Xiamen Road and Bridge Construction Group Co., Ltd., Xiamen, Fujian 361026, China)

Abstract: The landside section of Xiamen Xiang'an subsea tunnel was under unfavorable ground condition with small buried depth and 3-lane large-section, which mainly is constructed by center cross diagram(CRD) method. Measured displacements and construction method of CRD were also analyzed. Results indicated that the estimation of measured displacement of CRD method should be dependent primarily on arch-crown subsidence and secondly on horizontal convergence. The curve of measured arch-crown subsidence of CRD method vs. time normally was in a shape of uplifted zigzag with a final stable value, and the subsidence is caused by each heading constituted of a certain proportion of final subsidence, which could be used as an index to forecast and control the final subsidence. The primary lining of CRD1 should be closed as soon as possible for reducing the final subsidence since half of which was caused during excavation of CRD1; experiences in this case show that the total arch-crown subsidence of CRD1 should be controlled within 200 mm for the safe operation. Combining measured displacements with field construction experiences, it shows that the guarantee of structure safety in Xiang'an subsea tunnel is 10 - 15 m for space between border upon headings, 1.0 - 1.5 m for each round of excavation(only

收稿日期: 2007 - 06 - 18; **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(2006AA11Z119)

作者简介: 张建斌(1975 -), 男, 1997 年毕业于河海大学水利水运学院水利工程专业, 现为博士研究生、工程师, 主要从事隧道建设管理等方面的研究工作。E-mail: hhuzhang@126.com

0.5 m for extreme poor ground condition), 6 m for maximal of step length in heading, and the invert arch should be closed as soon as possible. The suggestion is verified in construction of Xiamen Xiang'an subsea tunnel.

Key words: subsea tunnel; excavation; center cross diagram(CRD) method; displacement monitoring; arch-crown subsidence

1 引言

位移监测是隧道施工中反映支护结构安全性的最直接方式,近年来针对隧道监控量测及反馈分析的研究日趋活跃^[1~9]。软弱地层大断面浅埋暗挖隧道技术难度大施工风险高,尤其是采用CRD法多导坑分部开挖,工序转换复杂,初期支护全断面闭合成环时间长,利用施工位移监控量测及反馈分析指导开挖和位移控制更重要。但针对三车道大断面浅埋暗挖隧道CRD法施工支护极限位移控制值以及支护稳定性判断基准的研究还不多,而且由于工程地质条件和施工工艺的差异性,目前还缺乏成熟的CRD法监控量测通用控制基准^[10~12]。

正在修建中的厦门翔安隧道是国内第一条大断面海底隧道,连接厦门本岛和翔安区,共三孔隧道,其中左右线行车隧道共设双向六车道,中孔为服务隧道。隧道两端陆域段为全强风化花岗岩地层,V级围岩,埋深6~30 m,行车隧道毛洞开挖宽度约17.0 m、高约12.5 m,实际开挖断面积达170 m²以上,地下水位为地表下2~6 m,隧道纵断面如图1所示,陆域V级围岩代表性的物理力学参数如表1所示^[13, 14]。为控制开挖后的围岩变形,在陆域软弱地段主要采用交叉中隔壁法(即CRD法)施工,分4个导坑,按CRD1→CRD3→CRD2→CRD4依次开挖和支护,变形稳定后再拆除中间临时支护,形成

整个隧道,如图2所示。在CRD法施工时,设置合理的预留变形量,掌握各导坑分部开挖中的初期支护变形规律,并对变形量进行适当控制,保证结构稳定性,是施工中的难点之一,如处理不当容易产生侵限换拱产生较大经济损失,甚至造成施工安全问题。本文选取陆域段隧道20个尽可能具有类似水文地质条件、埋深、支护形式和施工方法的行车隧道典型监测断面位移实测数据^[15],研究分析其变形规律,为信息化施工和动态设计以及施工现场控制提供指导。

2 隧道施工及位移监测方案

翔安隧道为三孔隧道,左右线隧道测设线间距52 m,服务隧道居中间,与主隧道净距22 m。在陆域全强风化地段,服务隧道断面较小采用台阶法开挖,施工中一般保持超前开挖60~100 m,超前2~3个月;左右线行车隧道由于施工单位不同,相互错开间距保持为50~80 m,错开时间2~3个月,因此3条隧道施工中的相互沉降影响非常小。本文研究的陆域V级围岩地段,隧道埋深为12~20 m,采用CRD法施工,导坑施工顺序为左上→右上→左下→右下。超前支护为 $\phi 42$ mm, $L = 4$ m、环向间距40 cm、纵向间距2.5 m的注浆超前小导管;初期支护为20b工字钢钢支撑(每榀间距50 cm),双层 $\phi 8$ mm 钢筋网(间距20 cm×20 cm),30 cm厚C25喷射

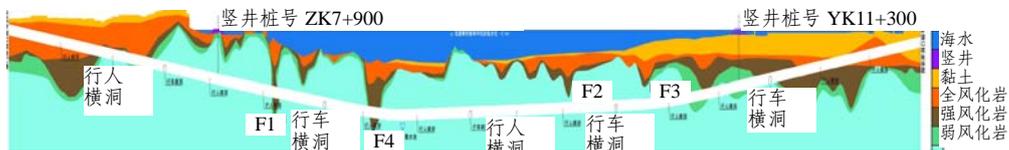


图1 翔安隧道工程纵断面图(左线)
Fig.1 Vertical section of Xiang'an subsea tunnel(left line)

表1 陆域V级围岩代表性物理力学参数^[13, 14]

Table 1 Physico-mechanical parameters of surrounding rock grade V in landside section^[13, 14]

土的含水量		稠性限度		渗透系数 (cm · s ⁻¹)	压缩性		剪切试验	
含水量/%	饱和度/%	液限/%	塑限/%		压缩系数/MPa ⁻¹	压缩模量/MPa	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
36.7	94.9	44.4	28.0	3.8 × 10 ⁻⁵	0.4	6.0	43.0	17.8

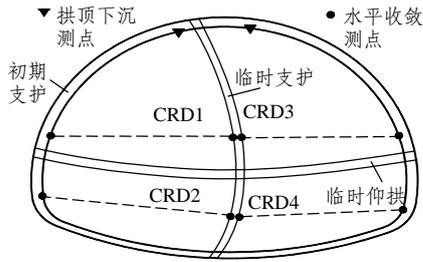


图 2 CRD 法断面及位移测点布置图

Fig.2 Sketch of CRD method and layout of displacement measuring points

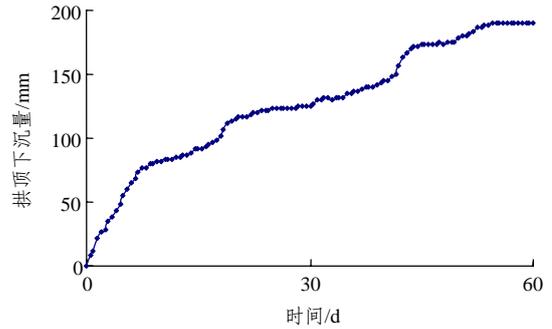


图 3 实测 CRD1 拱顶下沉时态曲线

Fig.3 Graph of measured arch-crown subsidence vs. time

混凝土, 必要时对局部不稳定地段适当调整参数(增加锁脚锚管等)加固处理^[11]。

陆域 V 级围岩地段 CRD 法施工每 15 m 设置一个位移监测断面, 位移测点横断面布置如图 2 所示。采用接触量测, 要求测点应距开挖面 1 m 范围内尽快安设, 并应在工作面开挖以后 12 h 内和下一次开挖之前测取初读数。通常情况下拱顶下沉和净空收敛的量测频率如表 2 所示。根据监测结果, 当围岩和支护呈不稳定状态时, 加密量测频率, 发布异常报告, 并建议适当加强支护。在富水的极软弱地段监测断面加密到 5~10 m。

表 2 拱顶下沉和净空收敛的量测频率

Table 2 Measurement frequency of arch-crown subsidence and convergence

位移速度/(mm·d ⁻¹)	距工作面距离/D	量测频率/(次·d ⁻¹)
>10	0~1	1~2
10~5	1~2	1
5~1	2~5	1
<1	>5	1/7

注: D 为隧道跨度。

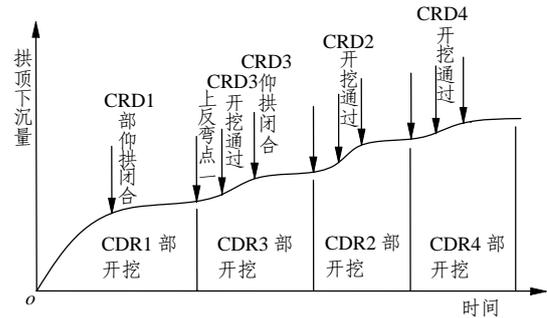


图 4 拱顶下沉时态曲线模型

Fig.4 Arch-crown subsidence vs. time model

敛趋势, 即下半断面施工部开挖对隧道变形有显著影响的范围一般是该开挖面前方 5 m 至后方 10 m 的范围; 曲线中的下反弯点与开挖分部仰拱闭合相对应, 即仰拱闭合对控制拱顶下沉十分关键。

在拱顶下沉时态曲线第一个上反弯点出现之前, 拱顶下沉量完全由 CRD1 开挖引起, 之后的拱顶下沉则由已开挖经过该断面的施工分部共同引起。根据本隧道 20 个典型断面的实测数据统计分析, CRD1 测得的最终拱顶下沉量比 CRD3 约大 30%; 各分部开挖引起的拱顶下沉增量与总拱顶下沉量具有一定的比例关系, 其中 CRD1 开挖对 CRD1 拱顶下沉的影响最大, 占其最终下沉值的 45%~55%; CRD3 开挖 CRD3 拱顶下沉的影响最大, 占其最终下沉值的 50%~60%, 具体如表 3 所示。

拱顶下沉曲线形态表明, 在下半断面 CRD2, 4 开挖通过时, 该开挖面前 5 m 和后 10 m 范围内上半断面会产生拱顶下沉快速增大的现象, 应予以重点监控; 各分部仰拱及时闭合对控制总体下沉量十分重要, 施工中必须提高初期支护钢拱架安装效率, 在软弱地段应切实作到短进尺、早封闭, 尤其是先行开挖的上半断面导坑支护的及时闭合对控制最终拱顶沉降最为关键。各施工部初期支护小环闭合与

3 拱顶下沉基本规律

本隧道 CRD1, 2 均布置拱顶下沉测点, CRD1 施工实测拱顶下沉典型时态曲线如图 3 所示, 其曲线模型可归纳为图 4。拱顶下沉由分段曲线组成, 总体呈台阶状上升, 正常情况下最后趋于稳定。每条曲线分布多个反弯点, 每个反弯点和后续施工分部通过该监测断面有关; 曲线中的上反弯点基本出现在分部开挖面到达监测断面前 5 m 左右, 当分部开挖面经过该监测断面 10 m 后曲线呈现明显的收

表 3 各分部开挖引起拱顶下沉增量比例

Table 3 Increment percentage of arch-crown subsidence caused by each heading excavation

开挖部	CRD1 拱顶下沉增量		CRD3 拱顶下沉增量	
	实测平均/mm	分布范围/%	实测平均/mm	分布范围/%
CRD1	49.1	45~55	已挖	-
CRD3	14.6	10~20	56.1	50~60
CRD2	23.3	20~30	24.7	20~30
CRD4	13.0	10~20	19.2	15~25

整个断面大环闭合所需的时间与现场施工工艺和工效直接相关，缩短台阶长度和相邻施工部掌子面间距，可缩短小环和大环闭合时间，对控制最终拱顶下沉有利，但间距太小对各掌子面稳定性也不利且无法满足施工场地要求。翔安隧道 CRD 法采用小型挖机和人工作业相结合，现场施工经验表明，相邻施工部导坑掌子面间距控制在 10~15 m，导坑内台阶长度控制在 6 m 以内，每循环开挖 1.0~1.5 m (极软弱地段只允许开挖 0.5 m)后立即支护，重点加快上半断面支护的闭合时间，是作业空间、掌子面开挖稳定性和“早封闭”之间较适合的平衡点，对控制最终拱顶下沉比较有效。

4 水平收敛基本规律

本隧道 CRD 法施工中每个分部仰拱闭合后即进行水平收敛量测。实测数据表明 CRD1, 3 水平收敛变化幅度及绝对值都较大，应予以重点关注；而 CRD2, 4 水平收敛变化幅度及绝对值均很小，暂不作单独研究。

本隧道实测 CRD1 的水平收敛典型时态曲线如图 5 所示，其基本曲线模型如图 6 所示(正值代表水平收敛，负值代表水平扩张)。通常情况下，CRD1 水平收敛曲线总体趋势表现为扩张值先增大后减小，最终稳定值呈扩张状态；曲线上分布多个反弯点，与后续通过该监测断面的施工分部开挖通过有关。由于 CRD1 水平收敛是从该部临时仰拱闭合后开始量测的，此时 CRD1 已呈收敛趋势，所以图 6 中在下一施工部到达前其水平收敛量测值很小。

实测数据表明，CRD3 仰拱闭合后，CRD3 水平收敛曲线与 CRD1 水平收敛曲线变化趋势基本呈

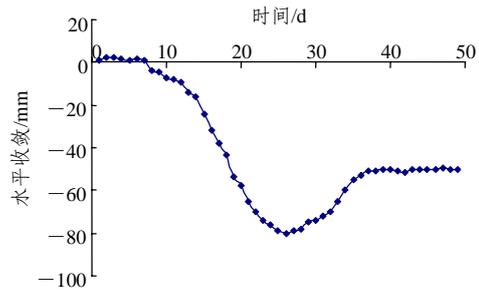


图 5 实测 CRD1 水平收敛时态曲线

Fig.5 Variation curve of measured horizontal convergence vs. time of CRD1

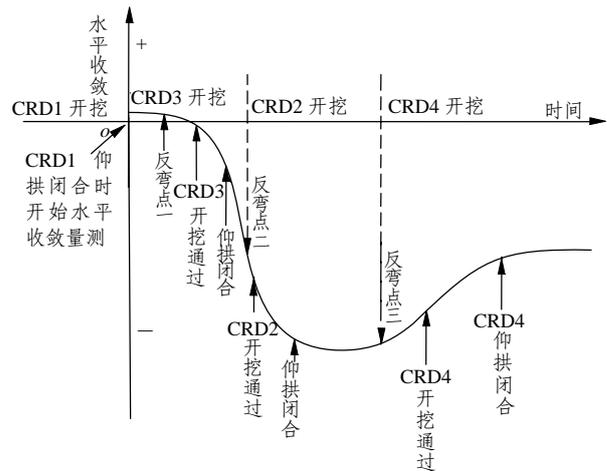


图 6 CRD1 水平收敛时态曲线模型

Fig.6 Variation curve of horizontal convergence vs. time model of CRD1

相反态势。对 CRD1, 3 水平收敛进行迭加处理，得到隧道上半断面整体水平收敛绝对值很小，即 CRD1, 3 水平收敛值基本上相互抵消。因此 CRD1, 3 水平收敛变化主要是由于临时支护中隔墙的变位引起的。

5 位移控制标准及预留变形量探讨

关于 CRD 法位移控制标准的研究比较少，目前还没有成熟的通用标准。本文主要根据现场实测数据、变形结果观测以及现场施工及加固处理等情况，进行探讨和总结。本隧道实测资料表明，CRD 法拱顶下沉绝对值比较大，而隧道整体收敛绝对值并不大。因此，CRD 法施工监控量测与分析应重点关注拱顶下沉。

本文所取的隧道区段 20 个典型断面实测资料表明，CRD1 最终拱顶下沉值为 103~328 mm，平

均下沉值为 191 mm; CRD3 最终拱顶下沉值为从 75~262 mm, 平均下沉值为 145 mm。CRD1 实测最终拱顶下沉平均比 CRD3 约大 30%, 原因是 CRD1 开挖后引起相邻导坑土层整体变形, 即 CRD3 开挖前产生一定的变形释放。因此, 现场应重点监测和控制首先开挖的 CRD1 拱顶下沉。各个断面的最终拱顶下沉值有所差别, 原因是局部地下水充分发育软化地层, 造成开挖困难, 个别极软弱断面甚至产生大变形, 需要加固处理。现场观测和加固处理经验表明, 当 CRD1 拱顶下沉超过 200 mm 时, 初期支护一般就发生开裂, 必须进行加固才能保证其变形稳定。因此, 本隧道该区段 CRD1 最终拱顶下沉控制在 200 mm 以内比较合适。

实测数据表明, 在相对稳定施工条件下, CRD 法各分部开挖引起的最终拱顶下沉具有相对固定的分配比例关系。因此, 在施工中可根据表 1 所示的比例关系预报和指示控制最终拱顶下沉量; 施工中如有超标倾向, 则可通过改进后续分部施工工艺, 如加强支护参数, 缩短进尺, 加快初期支护安装和闭合时间等, 达到控制隧道最终拱顶下沉的目标。该区段 CRD 法原设计预留变形量为 120 mm, 实际施工难以满足。对于无地表建筑物地段, 根据监测数据, 预留变形量调整为 160~200 mm 比较合适, 具体根据区段的地质条件和地下水发育情况确定。

6 结 论

(1) 翔安隧道 CRD 法施工一般拱顶下沉绝对值比较大, 隧道整体水平收敛绝对值比较小; CRD 法位移监控量测与分析判断指标应以拱顶下沉为主, 水平收敛为辅。

(2) 翔安隧道 CRD 法施工正常情况下, 拱顶下沉为台阶状上升曲线, 最后趋于稳定。各分部开挖引起的拱顶下沉增量具有一定的分配比例关系, 用于最终拱顶下沉量进行预测和控制时机指示, 各分部仰拱尽早封闭对控制最终下沉很重要, 施工中应着重控制引起下沉量比例最大(约占 50%)也是最早开挖的 CRD1 初期支护及时闭合。对后续施工控制具有很好的指导意义。

(3) 根据现场施工经验, 翔安隧道陆域段 CRD 法施工时, CRD1 最终拱顶下沉控制在 200 mm 以内比较合适, 预留变形量可根据具体条件调整为

160~200 mm, 而相邻导坑掌子面间距控制在 10~15 m, 每循环开挖 1.0~1.5 m(极软弱地段只允许开挖 0.5 m)后立即支护, 导坑内台阶长度控制在 6 m 以内, 及时封闭仰拱, 在后续施工中证明对控制最终拱顶下沉和保证支护结构稳定性成效良好。

参考文献(References):

- [1] 吕 勤, 张顶立, 黄 俊. 城市地铁暗挖施工地层变形机制及控制实践[J]. 中国安全科学学报, 2003, 13(7): 29 - 34.(LU Qin, ZHANG Dingli, HUANG Jun. Mechanism of stratum deformation and its control practice in tunneling urban subway at shallow depth[J]. China Safety Science Journal, 2003, 13(7): 29 - 34.(in Chinese))
- [2] 钟有信, 罗草原. 浅埋暗挖地铁施工地层沉降监测与控制[J]. 西部探矿工程, 2003, (4): 91 - 93.(ZHONG Youxin, LUO Caoyuan. Ground settlement monitoring and control in metro construction by underground cutting with shallow overburden[J]. West-China Exploration Engineering, 2003, (4): 91 - 93.(in Chinese))
- [3] 翁汉民. 地下工程量测与试验[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1989.(WENG Hanmin. Measurement and experinent in underground engineering[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 1989.(in Chinese))
- [4] 夏才初, 李永盛. 地下工程测试理论与监测技术[M]. 上海: 同济大学出版社, 1999.(XIA Caichu, LI Yongsheng. Testing theory and monitoring technology of underground engineering[M]. Shanghai: Tongji University Press, 1999.(in Chinese))
- [5] 刘 波, 陶龙光, 叶圣国, 等. 地铁隧道施工引起地层变形的反分析预测系统[J]. 中国矿业大学学报, 2004, 33(3): 277 - 282.(LIU Bo, TAO Longguang, YE Shengguo, et al. Back analysis prediction system for ground deformation due to subway tunnelling excavation[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2004, 33(3): 277 - 282.(in Chinese))
- [6] 姬永红. 隧道施工引起横向地层沉降的随机预测[J]. 岩土工程技术, 2004, 18(1): 16 - 18, 34.(JI Yonghong. Stochastic theory for predicting latitudinal stratum settlement due to tunnel construction[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2004, 18(1): 16 - 18, 34.(in Chinese))
- [7] 刘洪洲. 华蓥山隧道新奥法施工中的位移量测分析[J]. 世界隧道, 1999, (3): 28 - 30, 35.(LIU Hongzhou. Displacement measurement analysis of Huayingshan tunnel during excavation with NATM[J]. World Tunnelling, 1999, (3): 28 - 30, 35.(in Chinese))
- [8] 王建宇. 隧道工程监测和信息化设计原理[M]. 北京: 中国铁道出

- 版社, 1990.(WANG Jianyu. Principle of information design and monitoring of tunnel engineering[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1990.(in Chinese))
- [9] 刘招伟, 何满潮, 肖红渠. 浅埋大跨连拱隧道施工中变形的监测与控制措施[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(3): 339 - 342.(LIU Zhaowei, HE Manchao, XIAO Hongqu. Deformation monitoring and control measures of shallow large-span dual-linked arch tunnel[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(3): 339 - 342.(in Chinese))
- [10] 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, 1994.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. JTJ042 - 94 Technical code for construction of highway tunnel[S]. Beijing: China Communications Press, 1994.(in Chinese))
- [11] 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.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. TB10204 - 2002, J163 - 2002 Code for construction on tunnel of railway[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2002.(in Chinese))
- [12] 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.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. TB10108 - 2002, J159 - 2002 Code for shotcrete-bolt construction method of railway tunnel[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2003.(in Chinese))
- [13] 朱光仪. 厦门翔安隧道及两岸接线工程两阶段施工图设计[R]. 武汉: 中交第二公路勘察设计研究院有限公司, 重庆交通科研设计院, 2005.(ZHU Guangyi. Detailed design of two-stage construction of Xiamen Xiang'an subsea tunnel and its connection lines[R]. Wuhan: CCCC Second Highway Consultants Co., Ltd., Chongqing Communications Research and Design Institute, 2005.(in Chinese))
- [14] 夏支埃. 厦门东通道工程施工图设计阶段工程地质综合勘察报告[R]. 武汉: 中交第二公路勘察设计研究院, 中铁大桥勘测设计院有限公司, 2005.(XIA Zhiai. Reconnaissance for detail design phase of Xiamen east passageway Xiang'an tunnel[R]. Wuhan: China Communications Second Highway Survey, Design and Research Institute, China Zhongtie Major Bridge Engineering Group Co., Ltd., 2005.(in Chinese))
- [15] 厦门东通道(翔安隧道)工程现场指挥部. 厦门东通道(翔安隧道)施工监控量测周报(200509~200702)[R]. 厦门: 厦门东通道(翔安隧道)工程现场指挥部, 2007.(Site Headquarter of Xiamen East Passageway Xiang'an Tunnel. Weekly displacements report of Xiamen east passageway Xiang'an tunnel(200509 - 200702)[R]. Xiamen: Site Headquarter of Xiamen East Passageway Xiang'an Tunnel, 2007.(in Chinese))