

隧道及地下工程建设丛书

王明年 路军富 刘大刚 于丽 编著



# 海底隧道全寿命 安全监控量测技术

---

Life-cycle Safety Monitoring Measurement Technology  
of Subsea Tunnel

---



人民交通出版社  
China Communications Press

U459.5  
2013/

要 容 内

隧道及地下工程建设丛书

Life-cycle Safety Monitoring Measurement Technology of  
Subsea Tunnel

# 海底隧道全寿命安全监控 量测技术

王明年 路军富 刘大刚 于丽 编著



人民交通出版社

## 内 容 提 要

本书是在总结近年来我国隧道监控量测技术以及历时 5 年的厦门翔安海底隧道全寿命安全监测技术研究等多项科研成果基础上完成的,全书共分为 7 章,主要包括概述、海底隧道全寿命安全监测系统设计方法、海底隧道全寿命安全监测位移非接触量测技术、海底隧道结构应力及地震和耐久性监测技术、海底隧道全寿命安全监测控制及管理基准、海底隧道全寿命安全监测信息分析与反馈、海底隧道全寿命安全监测系统开发等。本书内容丰富,具有很强的工程实用性。

本书可作为公路、铁路和水工隧道监控、设计、施工和管理人员的参考用书,亦可作为土木工程专业(隧道方向)、隧道及地下工程专业本科生、研究生教材用书。

### 图书在版编目(CIP)数据

海底隧道全寿命安全监控量测技术 / 王明年等编著.

—北京:人民交通出版社,2012.3

ISBN 978-7-114-09634-1

I. ①海… II. ①王… III. ①水下隧道-安全监测-  
测量技术 IV. ①U459.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 016998 号

隧道及地下工程建设丛书

书 名:海底隧道全寿命安全监控量测技术

著 作 者:王明年 路军富 刘大刚 于 丽

责任编辑:王文华 (wwh@ccpress.com.cn)

出版发行:人民交通出版社

地 址:(100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街 3 号

网 址:<http://www.ccpress.com.cn>

销售电话:(010) 59757969, 59757973

总 经 销:人民交通出版社发行部

经 销:各地新华书店

印 刷:北京市密东印刷有限公司

开 本:787×1092 1/16

印 张:15.25

字 数:352 千

版 次:2012 年 3 月 第 1 版

印 次:2012 年 3 月 第 1 次印刷

书 号:ISBN 978-7-114-09634-1

定 价:34.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

# 前 言

2010年4月,随着中国大陆第一条海底隧道——厦门翔安海底隧道的建成通车,我国海底隧道建设进入了新的历史时期。海底隧道的主要特点是:地质条件复杂,水压高,地下水具有腐蚀性等,由此,给海底隧道设计、施工及维修养护带来极大风险。为了确保海底隧道施工和运营的安全,本书提出了海底隧道全寿命安全监测的概念。

隧道全寿命安全监测实际上包括两个阶段,即施工阶段监测和运营阶段长期监测。传统的安全监测也包括这两个阶段,但一般将施工阶段监测和运营阶段长期监测简单地按时间顺序进行划分,很少考虑两者的联系。本书基于风险辨识理论建立的海底隧道全寿命期安全监测系统设计方法,将施工阶段监测和运营阶段长期监测作为一个监测体系的两个阶段进行研究,既体现了海底隧道安全监测两个不同阶段的特点,也保证了两阶段为一个整体的监测体系,因此,监测计划、监测方法、监测设备、监测断面、监测点位、评价方法和监测频率等都要作为一个整体监测体系来考虑,这样不但能保证施工阶段监测和运营阶段长期监测的连续性,而且保证了安全,节约了投资。

本书共分7章,第1章概述,第2章海底隧道全寿命安全监测系统设计方法,第3章海底隧道全寿命安全监测位移非接触量测技术,第4章海底隧道结构应力及地震和耐久性监测技术,第5章海底隧道全寿命安全监测控制及管理基准,第6章海底隧道全寿命安全监测信息分析与反馈,第7章海底隧道全寿命安全监测系统开发。

本书是在总结近年来我国隧道监控量测技术以及历时5年的厦门翔安海底隧道全寿命安全监测技术研究等多项科研成果基础上完成的。书中还引用了国内外已有的专著、文章、规范、研究报告等成果,在此一并表示感谢。虽然我们尽了很大努力,但由于学识水平有限,错误之处在所难免,敬请读者批评指正。

编著者

2011年10月



# 目 录

|                                     |    |
|-------------------------------------|----|
| 第1章 概述 .....                        | 1  |
| 第2章 海底隧道全寿命安全监测系统设计方法 .....         | 6  |
| 2.1 海底隧道风险辨识方法 .....                | 6  |
| 2.2 基于风险等级标准的海底隧道安全监测等级划分 .....     | 7  |
| 2.3 海底隧道全寿命安全监测等级评定方法 .....         | 10 |
| 2.3.1 海底隧道全寿命安全监测风险因素识别 .....       | 10 |
| 2.3.2 海底隧道设计阶段全寿命安全监测等级定性评定 .....   | 11 |
| 2.3.3 海底隧道施工阶段全寿命安全监测等级模糊评定 .....   | 11 |
| 2.4 海底隧道各监测等级监测项目设置 .....           | 17 |
| 2.4.1 海底隧道变异形态与监测等级的关系 .....        | 17 |
| 2.4.2 海底隧道各监测等级监测项目设置 .....         | 26 |
| 2.5 海底隧道全寿命安全监测项目的断面布置及监测频率设定 ..... | 27 |
| 2.5.1 监测项目断面及测点布置 .....             | 27 |
| 2.5.2 监测频率设定 .....                  | 29 |
| 2.6 厦门翔安海底隧道全寿命安全监测系统设计 .....       | 30 |
| 2.6.1 监测风险因素识别 .....                | 30 |
| 2.6.2 监测等级分区及评定 .....               | 31 |
| 2.6.3 监测项目设置 .....                  | 45 |
| 2.6.4 监测断面布置及频率设定 .....             | 46 |
| 第3章 海底隧道全寿命安全监测位移非接触量测技术 .....      | 52 |
| 3.1 全站仪非接触量测技术 .....                | 52 |
| 3.1.1 自由设站原理 .....                  | 52 |
| 3.1.2 误差控制方法 .....                  | 55 |
| 3.1.3 隧道分部开挖量测技术 .....              | 61 |
| 3.2 数码摄影非接触量测技术 .....               | 67 |
| 3.2.1 图像坐标系下目标点获取技术 .....           | 67 |
| 3.2.2 图像坐标系与实际坐标系转换技术 .....         | 75 |
| 3.2.3 三维位移量测方法 .....                | 80 |
| 3.2.4 位移信息采集设备 .....                | 88 |
| 3.2.5 现场试验 .....                    | 90 |
| 3.3 巴塞特系统 .....                     | 99 |
| 3.3.1 传感器组成 .....                   | 99 |

|            |                            |            |
|------------|----------------------------|------------|
| 3.3.2      | 工作原理                       | 101        |
| 3.3.3      | 现场系统安装                     | 102        |
| <b>第4章</b> | <b>海底隧道结构应力及地震和耐久性监测技术</b> | <b>105</b> |
| 4.1        | 光纤光栅传感器应力监测技术              | 105        |
| 4.1.1      | 光纤光栅基本结构及原理                | 105        |
| 4.1.2      | 光纤光栅传感器                    | 107        |
| 4.1.3      | 光纤光栅采集设备                   | 109        |
| 4.1.4      | 光纤光栅传感器安装                  | 111        |
| 4.2        | 振弦式传感器应力监测技术               | 114        |
| 4.2.1      | 振弦式传感器                     | 114        |
| 4.2.2      | 振弦式采集设备                    | 116        |
| 4.2.3      | 振弦式传感器安装                   | 117        |
| 4.3        | 地震加速度监测技术                  | 121        |
| 4.3.1      | 地震加速度传感器                   | 121        |
| 4.3.2      | 地震加速度采集设备                  | 121        |
| 4.3.3      | 地震加速度传感器安装                 | 122        |
| 4.4        | 结构耐久性监测技术                  | 122        |
| 4.4.1      | 腐蚀监测传感器                    | 122        |
| 4.4.2      | 腐蚀监测采集设备                   | 125        |
| 4.4.3      | 腐蚀监测传感器安装                  | 126        |
| <b>第5章</b> | <b>海底隧道全寿命安全监测控制及管理基准</b>  | <b>127</b> |
| 5.1        | 海底隧道施工阶段位移和应力控制基准          | 127        |
| 5.1.1      | 位移控制基准                     | 127        |
| 5.1.2      | 应力控制基准                     | 135        |
| 5.2        | 海底隧道运营阶段位移和应力控制基准          | 135        |
| 5.2.1      | 位移控制基准                     | 135        |
| 5.2.2      | 应力控制基准                     | 154        |
| 5.3        | 海底隧道施工阶段安全管理基准             | 162        |
| 5.3.1      | 安全性判定指标                    | 163        |
| 5.3.2      | 施工阶段安全管理基准                 | 167        |
| 5.3.3      | 异常、险情和失稳报告编写               | 167        |
| 5.4        | 海底隧道运营阶段安全管理基准             | 170        |
| 5.4.1      | 安全判定指标                     | 170        |
| 5.4.2      | 海底隧道运营阶段安全管理基准             | 170        |
| 5.5        | 海底隧道腐蚀及地震监测管理基准            | 170        |
| 5.5.1      | 腐蚀监测管理基准                   | 170        |
| 5.5.2      | 地震监测管理基准                   | 171        |
| 5.6        | 海底隧道二次衬砌施作时机管理基准           | 171        |

|             |                                 |            |
|-------------|---------------------------------|------------|
| 5.6.1       | 判定指标 .....                      | 172        |
| 5.6.2       | 基本稳定变形速率确定方法 .....              | 172        |
| 5.6.3       | 二次衬砌施作时机管理基准 .....              | 174        |
| <b>第6章</b>  | <b>海底隧道全寿命安全监测信息分析与反馈 .....</b> | <b>179</b> |
| 6.1         | 海底隧道位移和应力监测分析技术 .....           | 179        |
| 6.1.1       | 一般回归分析技术 .....                  | 179        |
| 6.1.2       | 分段非线性拟合技术 .....                 | 180        |
| 6.1.3       | 其他分析技术 .....                    | 182        |
| 6.2         | 海底隧道衬砌无结构应力试验 .....             | 186        |
| 6.2.1       | 试验方案及试验仪器 .....                 | 186        |
| 6.2.2       | 混凝土自由体积变形试验结果分析 .....           | 188        |
| 6.2.3       | 混凝土水化热监测结果分析 .....              | 193        |
| 6.2.4       | 包裹混凝土应变计监测结果分析 .....            | 196        |
| 6.2.5       | 二次衬砌应力修正 .....                  | 197        |
| 6.3         | 海底隧道监测信息反馈技术 .....              | 199        |
| 6.3.1       | 施工阶段监测信息反馈技术 .....              | 199        |
| 6.3.2       | 运营阶段监测信息反馈技术 .....              | 203        |
| <b>第7章</b>  | <b>海底隧道全寿命安全监测系统开发 .....</b>    | <b>208</b> |
| 7.1         | 监测系统构架 .....                    | 208        |
| 7.2         | 监测系统集成 .....                    | 208        |
| 7.2.1       | 传感器系统 .....                     | 210        |
| 7.2.2       | 数据采集系统组网 .....                  | 211        |
| 7.2.3       | 数据管理系统 .....                    | 212        |
| 7.2.4       | 安全性评价与对策系统 .....                | 214        |
| 7.3         | 监测系统软件组成 .....                  | 214        |
| 7.3.1       | 施工阶段位移非接触量测子系统 .....            | 214        |
| 7.3.2       | 运营阶段长期监测子系统 .....               | 216        |
| 7.3.3       | 软件功能与特点介绍 .....                 | 217        |
| 7.4         | 监测系统软件功能实现 .....                | 218        |
| 7.4.1       | 施工阶段位移非接触量测子系统功能实现 .....        | 218        |
| 7.4.2       | 运营阶段长期监测子系统功能实现 .....           | 223        |
| 7.4.3       | 数码摄影位移非接触量测系统程序实现 .....         | 227        |
| <b>参考文献</b> | <b>.....</b>                    | <b>233</b> |

# 第1章 概述

2010年4月,随着中国大陆第一条海底隧道——厦门翔安海底隧道的建成通车,我国海底隧道建设进入了新的历史时期。目前,正在建设的海底隧道有青岛至黄岛海底隧道。正在规划和设计的海底隧道有厦门第二西通道、琼州海峡隧道等。

海底隧道具有地质条件复杂、水压高和地下水具有腐蚀性等主要特点,由此,给海底隧道设计、施工及维修养护带来极大风险<sup>[1-2]</sup>。为了确保海底隧道施工和运营安全,本书提出了海底隧道全寿命安全监测的概念。

海底隧道全寿命安全监测实际上包括两个阶段,即施工阶段监测和运营阶段长期监测。

施工阶段监测目前已经作为隧道施工的一道工序,是隧道施工必不可少的环节。近年来,国内外对大型桥梁和水坝等重要结构进行了运营阶段长期监测,这些监测成果对于研究结构长期受力形态和维修养护具有重要意义。目前,除对英法海峡隧道和日本青函隧道进行了长期监测研究外,其他隧道结构进行长期监测研究的工程案例并不多见。由于隧道围岩具有流变特性,其荷载随时间而变化,同时,由于海底隧道受海水的腐蚀作用,支护体系的力学性能会不断降低。因此,为保证海底隧道结构的长期安全性而进行的长期监测研究已经成为一个紧迫的课题。

隧道工程中,传统的安全监测将施工阶段监测和运营阶段长期监测简单地按时间顺序进行划分,很少考虑两者的联系。

本书基于风险辨识理论建立的海底隧道全寿命期安全监测系统设计方法,将施工阶段监测和运营阶段长期监测作为一个监测体系的两个阶段进行研究,既体现了海底隧道安全监测两个不同阶段的特点,也保证了两阶段为一个整体的监测体系。因此,监测计划、监测方法、监测设备、监测断面、监测点位、评价方法和监测频率等都要作为一个整体监测体系来考虑,这样不但能保证施工阶段监测和运营阶段长期监测的连续性,而且保证了安全,节约了投资。

目前,隧道监测技术的最新发展主要包括以下几个方面。

## 1) 隧道安全监测等级划分

隧道安全受工程地质、水文地质、设计条件、施工技术、隧道特点、工程管理等风险因素影响,对于隧道不同区段,这些风险因素的作用也是不同的,因此,应对隧道不同区段进行监测等级的划分。

目前,隧道的相关设计规范中还没有一套不同区段监测等级的划分方法<sup>[3-4]</sup>。为此,本书根据海底隧道不同区段的风险影响因素,利用风险辨识、模糊数学、层次分析法等理论建立了海底隧道全寿命监测等级的划分方法,并确定了不同监测等级对应的监测类型、监测项目、监测断面和监测频率等参数。



2)隧道监测技术

对于一般隧道,监测技术主要包括位移监测技术和应力监测技术,对于海底隧道,还应包括地震监测技术和耐久性监测技术。

(1)隧道位移监测技术——非接触量测技术

隧道位移监测是保证隧道掌子面后方初期支护安全的重要手段,是隧道施工过程中必不可少的施工工序。特别是对于复杂地质隧道,监控量测对于隧道的安全施工、围岩级别变更、支护参数调整、临时支护拆除时机的确定及二次衬砌施作时机的确定,将起到至关重要的作用。目前,隧道位移监测主要包括两个方面:拱顶下沉量测,一般采用钢挂尺和水准仪进行;收敛量测,包括水平收敛和倾斜收敛,一般采用收敛计进行。

对于大断面隧道,常规的接触量测存在以下问题:①往往采用分部开挖方法,如CD法、CRD法或双侧壁导坑法等,由于开挖不对称,结构变形和受力也不对称,而且临时支撑变形量大,并随工序的推进表现为有时扩大有时收缩,常规收敛量测无法确定变形的不对称性和主要变形部位。②常规量测几乎不可能实施,即使勉强能够实施,量测精度差,安全施工风险增大。③常规量测时间长,施工干扰大,虽然监控量测已作为一道工序被安排在施工组织设计中,但还是希望时间越短越好。

近年来,特长隧道、大跨度隧道日益增多,施工方法多变,这给隧道周边位移量测带来了不同程度的困难,并对位移量测方法和精度提出更高的要求,为此,发展了非接触量测技术。

非接触量测是指在不接触被测目标点的情况下,获取被测点的空间位移信息的方法。通过量测得到隧道内周边某点的三维坐标 $x$ 、 $y$ 、 $z$ ,以便分析其三维绝对位移 $u$ 、 $v$ 、 $w$ ;同时也可通过两点的三维坐标,计算洞内的收敛位移,其精度也能满足隧道收敛量测的要求。

非接触量测可以测量测点的绝对位移,可以很好地表达不对称变形。由于不需要尺子,可以很好地适应大断面隧道位移监测。非接触量测可以远离断面进行观测,避免由于量测工作对掌子面施工产生干扰,同时也避免施工对量测工作的干扰,而且量测时间也大大缩短。

目前,非接触量测技术主要包括:全站仪自由设站非接触量测技术,近景摄影(经纬仪、普通相机、数码相机)量测技术,巴塞特系统,激光断面仪量测技术等,这些非接触量测技术的特点见表1-1<sup>[5]</sup>。

隧道位移非接触量测技术特点 表 1-1

| 非接触量测方法 |       | 量测过程       | 适应性  |       | 量测内容        | 精度<br>(mm) | 价格 | 应用现状          |
|---------|-------|------------|------|-------|-------------|------------|----|---------------|
|         |       |            | 环境要求 | 工法适用性 |             |            |    |               |
| 全站仪自由设站 |       | 较简便,对施工干扰小 | 要求较低 | 各种工法  | 三维绝对位移、净空收敛 | ≤1         | 一般 | 已用于实际工程       |
| 近景摄影    | 摄影经纬仪 | 复杂,对施工干扰大  | 要求较高 | 有局限性  | 超、欠挖判断      | 1~5        | 昂贵 | 推广难           |
|         | 普通相机  | 简便,对施工干扰小  |      |       | 超、欠挖判断      | 1.5        | 便宜 | 推广难,将会淘汰      |
|         | 数码相机  | 简便,对施工干扰小  |      |       | 三维绝对位移、净空收敛 | ≤1         | 便宜 | 实验室研发阶段,技术不成熟 |

续上表

| 非接触量测方法 | 量测过程       | 适 应 性 |        | 量测内容       | 精度<br>(mm) | 价 格 | 应用现状    |
|---------|------------|-------|--------|------------|------------|-----|---------|
|         |            | 环境要求  | 工法适用性  |            |            |     |         |
| 巴塞特系统   | 仪器安装难度大    | 无要求   | 有局限性   | 自动记录断面变形过程 | $\leq 1$   | 昂贵  | 已用于实际工程 |
| 激光断面仪   | 较简便,对施工干扰小 | 要求较低  | 多种施工方法 | 超、欠挖判断     | 2          | 一般  | 已用于实际工程 |

本书将重点讨论隧道位移全站仪自由设站非接触量测技术、数码摄影非接触量测技术和巴塞特系统等。

## (2) 隧道应力监测技术——光纤光栅传感技术

自从 1989 年美国人 Moray 等首次进行光纤光栅传感器研究以来,世界各国都对其十分关注,并展开了深入的应用研究,在短短的 20 多年时间里,光纤光栅传感器已成为传感领域发展最快的技术。

光纤光栅传感器质量轻、耐腐蚀、抗电磁干扰、使用安全可靠,具有传输与传感的特性,具备可连续、无间断、长距离测量等特点。用光纤光栅可以方便地实现被测量的分布式传感,这种光纤光栅传感器在重要建筑物及航空航天等方面具有广阔的应用前景。

海底隧道不但受海水的腐蚀,而且受杂散电流作用和电磁的强烈干扰,因此,传统的振弦式传感器很难适用于海底隧道的环境。而光纤光栅传感器具有耐腐蚀性强、抗电磁干扰的特点,因此,本书重点研究光纤光栅传感器的应用技术。

## (3) 隧道地震监测技术

开展地震作用下隧道破坏机理分析,首先要碰到的是地震波的选取问题。地震波是一个频带较宽的非平稳随机振动,受多种因素影响而变化,如发震断层位置、板块运动形式、震中距、波传递途径的地质条件、场地土构造和类别等,往往同次地震在同一场地得到的强震记录也不相同,因此无法针对每个建筑场地准确地预见未来的地面运动,这给抗震设计中需采用什么样的地震波带来了困难,因此地震波选取的合理是保证计算结果可靠性的关键。为对海底隧道地震稳定性评价提供实际、准确的地震波,开展隧道地震监测具有重要的意义。因此,本书重点介绍了三向地震加速度传感器地震监测技术。

## (4) 耐久性监测技术——埋入式无损腐蚀监测技术

在各类大型工程结构中,如地面建筑工程、桥梁工程、基础工程、隧道工程、水坝、地铁、矿井等,混凝土中钢筋的腐蚀所带来的危害是目前全世界范围都非常关注的重大问题。混凝土材料自身的劣化和钢筋腐蚀共同影响混凝土结构的耐久性,使整个工程的安全性及可靠性受到威胁,其中钢筋锈蚀是影响钢筋混凝土结构耐久性和使用寿命的最重要因素。因此,发展钢筋腐蚀实时监测技术、提高混凝土内钢筋锈蚀程度与腐蚀速度检测的准确性和工作效率、实现钢筋混凝土结构健康自诊断,对评估结构耐久性、及时采取合理的加固措施有着重要的意义。

作为海底隧道支护体系的钢筋混凝土结构,如果受到海洋环境中氯化物的不断侵入或混凝土逐渐碳化等过程随时间的积累,就可能引起混凝土的 pH 值降低,造成钢筋表面钝化膜破坏,进而发生局部腐蚀。为了确保海底隧道建成后的长期安全运行,有必要采用合适的

现场检测/监测技术,及时了解和控制钢筋在混凝土中的腐蚀行为。因此,应用非破损监测/检测技术对海底隧道支护结构进行长期的现场跟踪监测,可以提供材料及结构性能随时间变化的完整信息,从而检测早期腐蚀,减少由于腐蚀所造成的巨大损失,避免可能发生的安全事故,具有重大意义。

最近几年,国内外工程师研发了各类外置式测试系统和埋入式腐蚀传感器,由于埋入式腐蚀传感器能更准确地实时监测混凝土内腐蚀环境的变化而被广泛应用,因为本书重点讲述了埋入式钢筋、混凝土无损腐蚀监测技术。

### 3) 隧道监测基准

隧道监测基准应该包括两个方面,即隧道位移和应力控制基准以及隧道安全管理基准。

#### (1) 隧道位移和应力控制基准

**位移控制基准:**目前《公路隧道设计规范》(JTG D70—2004)规定的位移控制基准主要以相对位移为重点,即拱顶下沉和边墙水平收敛控制基准。在隧道变形不对称的情况下,无法进行隧道安全性判定。对于大断面公路隧道,当采用分部开挖时(如CD法、CRD法和双侧壁法),开挖断面中存在很多临时支撑,目前《公路隧道设计规范》(JTG D70—2004)规定的位移控制基准采用相对位移,无法判定临时支撑的安全性。因此,应该建立隧道绝对位移控制基准。

**应力控制基准:**目前《公路隧道设计规范》(JTG D70—2004)对二次衬砌的安全系数进行了规定,但对二次衬砌应力没有规定,因此,应建立二次衬砌应力控制基准。

#### (2) 隧道安全管理基准

隧道安全管理基准包括两个方面,即施工阶段安全管理基准和运营阶段长期安全管理基准。

目前,隧道施工阶段安全管理基准主要存在以下两个问题。第一,判定指标不完善。《公路隧道设计规范》(JTG D70—2004)和《公路隧道施工技术规范》(JTG F60—2009)的施工安全管理基准主要采用位移控制基准、位移变化率和位移加速度等定量指标。这个施工安全管理基准没有考虑隧道施工方法和支护体系的复杂性,即隧道初期支护受力与开挖方法和支护刚度关系极大,隧道初期支护受力是不均匀的,而且各部分应力是不断调整的。因此,隧道施工现场经常出现以下情况:有些隧道周边位移超出位移控制基准值,但支护结构没有产生破坏;有时变形速率很大,但是隧道周边位移还远小于控制基准值,也未发生结构破坏;有的隧道工程(特别是浅埋隧道)位移尚未达到位移控制基准值,但支护结构已经失稳。为此,在施工阶段安全管理基准中,除了给出定量指标外,还应该增加定性指标,即支护结构的裂缝状态和地下水状态。第二,没有考虑时间因素的影响。隧道从预测破坏到采取措施再到完成这些措施,是有一定时间的,在这段时间内,隧道破坏还会加速发展。目前,规范中的施工安全管理基准没有考虑时间因素的影响,因此,施工安全管理基准实际应用非常困难。为此,本书建立了以隧道位移、变形速率、变形加速度为定量指标,并以支护结构裂缝状态、地下水状态为定性指标的隧道施工阶段安全管理基准。

对于隧道运营阶段长期安全管理基准,目前《公路隧道设计规范》(JTG D70—2004)和《公路隧道施工技术规范》(JTG F60—2009)还没有规定,为此,本书建立了以海底隧道二次衬砌为对象的运营阶段长期安全管理基准。

#### 4) 隧道监测信息分析与反馈技术

隧道监测信息分析与反馈技术包括两个方面,即位移信息分析与反馈技术、应力信息分析与反馈技术。

位移信息分析与反馈技术一般常用回归分析模型,也有应用灰色理论模型和人工神经网络模型等。当隧道采用分部开挖时,传统的回归分析模型不能有效地预测隧道的最终变形,此时,可以采用分段回归分析模型。

应力信息分析与反馈技术中,一般需要通过无结构应力试验,获得无结构应力(自生体积变形应力和温度应力),然后在实测应力中除去无结构应力,获得结构的实际应力,对实际应力进行一般回归分析或分段回归分析,从而对隧道结构应力进行预测。

#### 5) 隧道监测系统

隧道监测系统包括监测系统的硬件集成和自动化监测软件系统。

监测系统的硬件集成主要包括传感器系统、数据采集系统、数据管理系统、安全性评价与对策系统等硬件系统的集成。

自动化监测软件系统主要包括施工阶段位移非接触量测系统和运营阶段长期监测系统等自动化软件系统。



## 第2章 海底隧道全寿命安全监测系统设计方法

本章主要介绍海底隧道全寿命安全监测系统设计方法,采用风险分析理论,基于风险等级标准对海底隧道全寿命安全监测等级进行划分;利用风险辨识、模糊数学、层次分析法等理论,建立全寿命监测等级评定方法;依据翔安海底隧道全寿命监测等级分区结果,通过对施工阶段的变异调查、现场监测数据的分析,各监测等级与变异形态关系的分析,最终设置各监测等级需监测的项目;最后进行海底隧道全寿命安全监测项目断面布置及监测频率设定。

### 2.1 海底隧道风险辨识方法

风险识别(风险辨识, risk identification)是工程项目风险评估及管理的基础和重要组成部分。风险识别的含义就是确定可能影响项目的风险事件,并将这些风险事件的诱发因素进行整理。风险识别是项目风险管理者识别风险来源、确定风险发生条件、描述风险特征并分类及评价风险影响的过程。

风险识别的方法很多,目前世界上比较流行的方法主要有:故障树法、专家调查法、情景分析法、SWOT 分析法、核对表法等,其中故障树法、专家调查法及核对表法较适用于海底隧道工程的风险识别<sup>[6]</sup>。

#### 1) 故障树法

故障树分析法是在 1961 年美国贝尔实验室对导弹发射系统进行安全分析时,由瓦特森提出的,由于这种方法优点很多,之后被广泛应用于工业和其他复杂大型系统中。该方法利用图解的形式,将大的故障分解成小的故障,同时对引起故障的原因进行分析。图的形式像树枝一样越分越多,故称故障树。故障树经常用于直接经验比较少的风险识别中,该方法的主要优点是能比较全面地分析所有故障的原因,包括人为的因素,而且比较形象、直观。与故障树相似的还有概率树、决策树等。

进行故障树分析的一般步骤如下:

- (1) 定义工程项目的目标,此时应将影响项目目标的各种风险因素予以充分考虑。
- (2) 作出风险效果图。
- (3) 全面考虑各种风险因素之间的相互关系,从而确定工程项目风险应采取的对策或行动方案。

#### 2) 专家调查法

专家调查法是大系统风险识别的主要方法,是以专家为索取信息的重要对象,各领域的

专家运用专业方面的理论知识和丰富的实践经验,找出各种潜在的风险并对其后果作出分析与估计。这种方法的优点是在缺乏足够的统计数据和原始资料的情况下,可以作出定量的估计。

专家调查法主要包括专家个人判断法、智暴法和德尔菲法等十余种方法,其中德尔菲法应用较广。德尔菲法是美国著名咨询机构兰德公司于20世纪50年代提出的。该方法以匿名方式通过几轮函询征求专家们的意见,然后对每轮意见汇总整理,最后将参考资料再发给各专家,供他们分析判断,提出新的论证。如此多次反复,专家们的意见趋于一致,使最终结论的可靠性越来越高。

### 3) 情景分析法

情景分析法是一种能够分析引起风险的关键因素及其影响的方法。一个情景就是一个对事件未来状态的描述,它采用图标或曲线的形式来描述当影响项目的某种因素作各种变化时,整个项目的变化及其后果,供人们进行比较研究。当各种目标相互冲突排斥时,情景分析就显得特别有用。

由上可知,在风险评估理论发展的过程中出现了多种风险识别方法。我国关于海底隧道修建方面的经验较少,目前还没有相关数据库,通过故障树识别方法,并结合专家调查的意见,通过德尔菲法进行修正,使专家的意见趋于一致,是较适合海底隧道施工风险识别的方法。

## 2.2 基于风险等级标准的海底隧道安全监测等级划分

隧道全寿命安全监测的主要目的为确保隧道在任何时期的安全性,预防工程事故的发生,降低施工和运营管理期间有可能造成的人身伤害、财产损失、环境损害、工程经济损失、工期延误等潜在的不利事件的发生概率和后果。在实际工程中,当遇到地质条件差、埋深浅、地下水丰富等工程环境时,隧道发生风险的概率较大,发生事故的后果较严重,对于此地段一般应加强监测,例如减小监测断面的距离、增加测点、增加量测频率等,而对于工程地质条件较好、围岩自稳性强的地段,隧道发生风险的概率较小,对于此地段一般无需监测或减少监测断面的数量。

目前规范中关于隧道监控量测项目的确定主要是通过围岩级别定性判定<sup>[7-10]</sup>,而隧道发生风险不仅与围岩级别有关,同时还与隧道埋深、施工方法、施工单位的管理水平等因素有关,这里引用风险分析理论建立隧道全寿命安全监测等级<sup>[11]</sup>。

### 1) 风险级别确定方法

风险需要用一个指标来度量,目前国际上常用的风险评级方法主要是通过发生风险的概率与风险后果乘积来确定,见式(2-1),主要有定性定级和定量定级两种方法。

$$R = P \times C \quad (2-1)$$

式中: $R$ ——风险水平级别;

$P$ ——发生风险的概率;

$C$ ——风险后果。

### 2) 发生风险概率等级与风险后果等级划分

由于风险等级主要是通过发生风险的概率和风险后果乘积确定,所以风险等级是由发

生风险的概率等级和风险后果等级共同确定,需对其进行等级划分。

(1) 发生风险的概率等级划分

风险事故发生的概率在施工中有着许多不确定的因素,它发生的时间、地点、形式、规模都不确定,数学中用概率或概率等级来描述这种不确定事件。根据不同风险事件发生的概率不同,参照我国《铁路隧道风险评估指南》,将风险事件的发生划分为5个等级,为便于定量分析,将不确定因素可能发生风险的概率转化为概率指数,见表2-1。

概率等级标准 表 2-1

| 概 率 范 围      | 中 心 值  | 概率等级描述 | 概 率 指 数 |
|--------------|--------|--------|---------|
| >0.3         | 1      | 频繁发生   | 5       |
| 0.03~0.3     | 0.1    | 可能发生   | 4       |
| 0.003~0.03   | 0.01   | 偶然发生   | 3       |
| 0.0003~0.003 | 0.001  | 很少发生   | 2       |
| <0.0003      | 0.0001 | 不可能发生  | 1       |

(2) 风险后果等级划分

对后果等级的评价根据不同的风险后果采用不同的评价等级,但所采用的等级相同,将事故造成的损失或不利后果分成5级,为便于定量分析,将可能发生风险后果的不确定因素转化为后果指数,见表2-2。

风险后果分级 表 2-2

| 事 件 定 义                          | 后 果 描 述 | 后 果 指 数 |
|----------------------------------|---------|---------|
| 大范围破坏,需要整个或部分重建;环境严重毁坏;人员伤亡      | 灾难性后果   | 5       |
| 危及主体工程;需要大量修复工作,环境遭受破坏,交通受阻;人员受伤 | 后果严重    | 4       |
| 需紧急处理,有财产损失;工程拖延,服务受干扰;人员轻伤      | 后果较轻    | 3       |
| 不需紧急处理,损失较小;服务未受干扰;人员轻度受伤        | 后果轻     | 2       |
| 轻微影响                             | 后果可忽略   | 1       |

各种后果或损失等级标准见表2-3~表2-6。

人员伤亡等级标准 表 2-3

| 后果定性描述    | 灾 难 性 的 | 很 严 重 的                       | 严 重 的                                   | 较 大 的                          | 轻 微 的    |
|-----------|---------|-------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------|----------|
| 后果等级      | 5       | 4                             | 3                                       | 2                              | 1        |
| 人员伤亡数量(人) | $F > 9$ | $2 < F \leq 9$ 或<br>$SI > 10$ | $1 \leq F \leq 2$ 或<br>$1 < SI \leq 10$ | $SI = 1$ 或<br>$1 < MI \leq 10$ | $MI = 1$ |

注:  $F$  为死亡人数,  $SI$  为重伤人数,  $MI$  为轻伤人数。

经济损失等级标准 表 2-4

| 后果定性描述   | 灾 难 性 的 | 很 严 重 的   | 严 重 的   | 较 大 的  | 轻 微 的 |
|----------|---------|-----------|---------|--------|-------|
| 后果等级     | 5       | 4         | 3       | 2      | 1     |
| 经济损失(万元) | >1 000  | 300~1 000 | 100~300 | 30~100 | ≤30   |

注:“~”含义为包括上限值,但不包括下限值。

工期延误等级标准

表 2-5

| 后果定性描述                      | 灾难性的 | 很严重的 | 严重的   | 较大的      | 轻微的   |
|-----------------------------|------|------|-------|----------|-------|
| 后果等级                        | 5    | 4    | 3     | 2        | 1     |
| 延误时间 1(控制工期工程)<br>(月/单一事故)  | >10  | 1~10 | 0.1~1 | 0.01~0.1 | ≤0.01 |
| 延误时间 2(非控制工期工程)<br>(月/单一事故) | >24  | 6~24 | 2~6   | 0.5~2    | ≤0.5  |

注：“~”含义为包括上限值,但不包括下限值。

环境影响等级标准

表 2-6

| 后果定性描述 | 灾难性的        | 很严重的        | 严重的 | 较大的         | 轻微的         |
|--------|-------------|-------------|-----|-------------|-------------|
| 后果等级   | 5           | 4           | 3   | 2           | 1           |
| 环境影响描述 | 永久的<br>且严重的 | 永久的<br>但轻微的 | 长期的 | 临时的<br>但严重的 | 临时的<br>且轻微的 |

注：“临时的”含义为在施工工期以内可以消除；“长期的”含义为在施工工期以内不能消除,但不会是永久的；“永久的”含义为不可逆转或不可恢复的。

### 3) 风险等级标准

ALARP 准则是最常用的风险接受准则,又称最低合理可行准则,其含义是任何工程活动都具有风险,不可能通过预防措施来彻底消除风险,必须在风险水平与利益之间作出平衡,如图 2-1 所示。图 2-1 中风险分为 3 个区域,若风险评价所得的风险等级处在不可接受区域,必须拒绝或采取强制性的措施降低风险水平;若风险等级处在风险可接受区,由于风险水平很低,无需采取任何应对措施;若风险等级处在合理可行的最大限度降低区,则需对实施各种降低风险水平措施后的效果进行考察,并进行对比分析,据此确定风险是否可以接受。

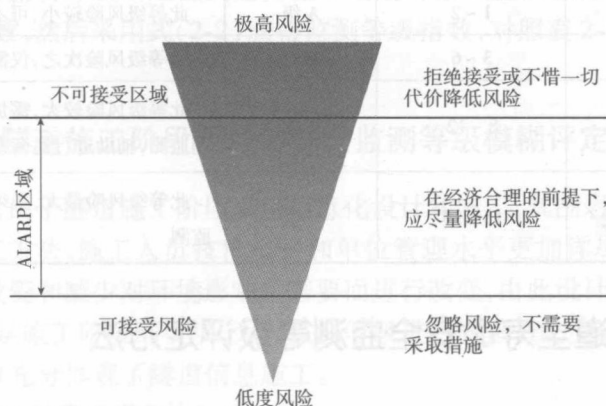


图 2-1 ALARP 风险管理准则

基于 ALARP 准则,将事故发生的概率和相应的后果置于一个矩阵中,该矩阵即为风险矩阵,本书所采用的风险矩阵参照我国《铁路隧道风险评估指南》,见表 2-7。



风险矩阵

表 2-7

| 后果等级<br>概率等级 |   | 轻微的 | 较大的 | 严重的 | 很严重的 | 灾难性的 |
|--------------|---|-----|-----|-----|------|------|
|              |   | 1   | 2   | 3   | 4    | 5    |
| 很可能          | 5 | 高度  | 高度  | 极高  | 极高   | 极高   |
| 可能           | 4 | 中度  | 高度  | 高度  | 极高   | 极高   |
| 偶然           | 3 | 中度  | 中度  | 高度  | 高度   | 极高   |
| 不可能          | 2 | 低度  | 中度  | 中度  | 高度   | 高度   |
| 很不可能         | 1 | 低度  | 低度  | 中度  | 中度   | 高度   |

4)全寿命安全监测等级划分

在实际隧道工程中,隧道某区段安全监测的重要程度与该区段风险发生的概率和风险后果有关,有时发生风险的概率大但后果较轻,此时可以减少监测,有时风险概率较小但后果为灾难性的,此时则需加强监测,由此全寿命安全监测的重要程度可由监测等级来确定。

基于风险等级确定方法,针对海底隧道工程的特殊性,全寿命安全监测等级主要是依据隧道发生风险的概率指数与风险后果指数乘积来评定,见式(2-2)。

$$M = P_1 \times C_1 \tag{2-2}$$

式中:M——全寿命安全监测等级指数;

$P_1$ ——隧道发生风险的概率指数;

$C_1$ ——隧道发生风险的后果指数。

基于风险等级管理标准和监测等级指数的评定方法[式(2-2)],按照监测等级指数范围将海底隧道全寿命监测等级由低到高依次划分为A、B、C、D 4个等级。依据隧道风险接受准则,确定各监测等级及对应的监测措施,见表2-8。

隧道全寿命监测等级划分表

表 2-8

| 风险等级 | 接受准则 | 监测等级指数 | 监测等级 | 监测措施                              |
|------|------|--------|------|-----------------------------------|
| 低度   | 可忽略  | 1~2    | A级   | 此等级风险较小,可不进行监测                    |
| 中度   | 可接受  | 3~6    | B级   | 此等级风险次之,仅需进行施工期监测                 |
| 高度   | 不期望  | 8~12   | C级   | 此等级风险较大,需加强监测,必须进行施工期监测,辅助进行运营期监测 |
| 极高   | 不可接受 | 15~25  | D级   | 此等级风险最大,必须加强监测,进行全寿命监测            |

2.3 海底隧道全寿命安全监测等级评定方法

2.3.1 海底隧道全寿命安全监测风险因素识别

1)地质条件风险识别

鉴于海底隧道线路的大部分位于水下,地质条件多变且难以预测,因而地质条件的风