

DB37

山 东 省 地 方 标 准

DB 37/T XXXX—XXXX

海底隧道不良地质灾害预控技术指南

Technical guideline for pre-control of adverse geological hazard in
submarine tunnel

(报批稿)

XXXX – XX – XX 发布

XXXX – XX – XX 实施

目 次

前言 II

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 总体原则 1

 4.1 预控目的 1

 4.2 预控原则 1

 4.3 预控流程 2

5 超前地质预报 2

 5.1 目的 2

 5.2 方案 2

 5.3 方法 2

 5.4 成果整理及反馈 5

6 控制技术 5

 6.1 目的 5

 6.2 方案 5

 6.3 材料 6

 6.4 方法 6

 6.5 效果检查与反馈 7

7 监控量测 8

 7.1 目的 8

 7.2 方案 8

 7.3 监测项目 8

 7.4 监测布置 8

 7.5 监测频率 9

 7.6 监测方法 9

 7.7 成果整理及反馈 9

附录 A（资料性） 超前地质预报钻探施工记录表 10

附录 B（资料性） 钻孔柱状图记录表 11

附录 C（资料性） 水流量、水质监测表 12

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由山东省交通运输厅提出并组织实施。

本文件由山东省交通运输标准化技术委员会归口。

本文件起草单位：山东大学、中铁第四勘察设计院集团有限公司、青岛国信发展（集团）有限责任公司、山东建筑大学、山东交通学院。

本文件主要起草人：张庆松、李相辉、冯啸、朱光轩、王德明、刘人太、伍雨、李翔、曲立清、谭明伦、倪健、蒋华、孙文昊、何家成、刘衍凯、陈新、白继文、郭少轩、余文轩、张华胜、张咪、段少龙、李睿、邵长志、邱贺坪。

海底隧道不良地质灾害预控技术指南

(送审稿)

1 范围

本文件提出了针对海底隧道不良地质灾害的超前地质预报、预控技术措施及监控量测的技术指南。本文件适用于存在断层破碎带、风化槽、岩溶等不良地质的钻爆法施工海底隧道工程。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

- DL/T 5783 《水电水利地下工程地质超前预报技术规程》
- JT/T 1375.3 《公路水运工程施工安全风险评估指南》
- JTG/T 3222 《公路工程物探规程》
- JTG/T 3371 《公路水下隧道设计规范》
- JTG/T 3660 《公路隧道施工技术规范》
- JTG/T D70 《公路隧道设计细则》

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1 不良地质灾害 adverse geological hazard

由断层破碎带、风化槽、岩溶等不良地质构造导致的坍塌、涌水涌泥等灾害。

3.2 预控 pre-control

在超前地质预报和施工风险评估的基础上，预先采取措施控制风险的过程。

3.3 注浆 grouting

将一定材料配置成浆液，利用压力或浆液自重，通过注浆管将浆液注入岩土体孔隙、裂隙或空洞中的方法。

4 总体原则

4.1 预控目的

海底隧道施工过程中通过采取有效的预控技术降低不良地质灾害发生风险，保障海底隧道建设安全。

4.2 预控原则

- a) 结合海底隧道特点、不良地质类型及工程需求，选取技术可行、与实际需求适合的超前地质预报方法、预控措施及监控量测方法，并分别编制专项技术方案；
- b) 开展不良地质段超前地质预报、施工控制及监控量测时，宜优先采取自动化、智能化的新技术；
- c) 采取性能可靠、绿色低碳的工程建设材料及相匹配的施工工艺，降低建设活动对海洋环境的影响。

4.3 预控流程

- a) 选取合适的超前地质预报方法探明不良地质信息，评估可能发生的灾害类型及风险；
- b) 根据超前预报成果选取合适的不良地质控制技术，进行超前治理；
- c) 通过信息化监控量测系统，监控不良地质段施工过程隧道围岩与结构稳定性。

5 超前地质预报

5.1 目的

5.1.1 探明海底隧道不良地质类型、大小、位置、空间展布特征及赋水情况，复核围岩等级、岩性、完整性、渗透性等信息，为制定预控措施提供地质依据。

5.2 方案

5.2.1 实施超前地质预报前，宜制定超前地质预报方案，内容宜包含：工程概况、编制依据、预报目的及范围、预报方法、工艺流程及操作要点、组织机构、投入人力与设备资源、质量要求与安全措施、预报成果分析编制等。

5.2.2 预报成果宜明确：围岩类别及其变化趋势、主要不良地质体的位置、规模与性质，海水与地下水的补给关系，不良地质灾害潜在风险分级与风险区段划分，并形成相应的图表及文字说明，为隧道不良地质段的安全控制提供依据。

5.2.3 海底隧道不良地质超前预报方案编制宜区分陆域段与海域段，陆域段宜选用地表与洞内联合的预报方法，海域段以洞内预报方法为主。

5.3 方法

5.3.1 海底隧道不良地质超前预报可选用地质调查法、超前钻探法和地球物理探测法。

5.3.2 超前地质预报方法的选择，宜根据工程条件、不良地质类型、预报目的、预报范围等，选取与隧道施工工法相匹配的一种或多种预报方法的组合。

5.3.3 依据预报目的，预报方法的选择宜遵循下列原则：

- a) 不良地质分布特征包括类型、大小、位置、空间展布特征等，可采用地质调查法、地球物理探测法（电磁波反射法、弹性波法）超前钻探法等进行探测；
- b) 不良地质围岩特征包括岩性、强度、完整性、渗透性及围岩等级等，可采用地质调查法、超前钻探法等进行探测；
- c) 不良地质赋水情况包括富水区位置、大小、水量等，可采用地球物理探测法（瞬变电磁法、直流电法）、超前钻探法等进行探测。

5.3.4 依据预报范围，超前地质预报可分为长距离预报、中长距离预报和短距离预报，预报方法的选择宜采用表 1 规定：

表1 基于预报范围的超前地质预报分类及可选用的预报方法

分类	预报范围	可选用的预报方法
长距离预报	预报距离 ≥ 100 m	地质调查法、地球物理探测法（弹性波法）
中长距离预报	$30\text{ m} \leq \text{预报距离} < 100\text{ m}$	地质调查法、地球物理探测法（电磁波反射法、弹性波法、瞬变电磁法）、超前钻探法
短距离预报	预报距离 $< 30\text{ m}$	地质调查法、地球物理探测法（电磁波反射法、弹性波法、直流电法）、超前钻探法

5.3.5 依据不良地质类型，超前地质预报方法宜遵循以下原则选取：

- a) 断层破碎带和海底风化槽宜以地质调查法、地球物理探测（电磁波反射法、弹性波法、瞬变电磁法）为主，其他方法为辅进行预报；
- b) 岩溶宜以地质调查法、地球物理探测（电磁波反射法、弹性波法、直流电法）、超前钻探法为主，其他方法为辅进行预报。

5.3.6 海底隧道超前地质预报宜遵循以下原则：

- a) 地质调查宜明确预报重点区段及主要不良地质类型，为地球物理探测与超前钻探方法的选用与成果解译提供地质依据；
- b) 地球物理探测宜选用两种或两种以上参数互补的预报方法，组成长短距离或中短距离的探测组合；
- c) 宜在地球物理探测发现异常及地质条件复杂的区段，按照循环作业的方式实施超前钻探。

5.3.7 地质调查法

5.3.7.1 采用地质调查法进行隧道施工期地质预报时，宜综合分析隧道勘察设计资料、隧址区地表及隧道内地质资料。

5.3.7.2 地质调查法包括勘察资料收集与分析、地表补充地质调查、隧道内地质素描等。

5.3.7.3 海底隧道勘察资料收集与分析，宜包含下列内容：

- a) 收集隧道勘察资料，获取海底构造、海底地层信息等地质资料；
- b) 掌握不良地质构造在隧道轴线上的分布位置，不良地质构造宽度、性质、产状，明确地层、不良地质构造与隧道的相互关系及因隧道施工可能诱发的地质灾害。

5.3.7.4 地表补充地质调查适用于海底隧道陆域段，宜包含下列内容：

- a) 对已有不良地质勘察成果的核查和确认；
- b) 地层、岩性在隧道地表的出露及接触关系，特别是对标志层的确认；
- c) 断层、褶皱、节理密集带等地质构造在隧道地表的出露位置、规模、性质及其产状变化情况，地表岩溶发育位置、规模及分布规律；
- d) 根据隧道地表补充地质调查结果，结合设计文件、资料和图纸，核实和修正超前地质预报重点区段。

5.3.7.5 海底隧道内地质素描宜包含下列内容：

- a) 工程地质；
- b) 水文地质；
- c) 围岩稳定性特征及支护情况；
- d) 隧道施工围岩分级；
- e) 影像资料。

5.3.8 地球物理探测法

5.3.8.1 地球物理探测法适用于被测不良地质体与周围介质存在明显的物性差异，且被测对象具有一定规模，地球物理探测法包括：电磁波反射法、弹性波法、瞬变电磁法、直流电法等。

5.3.8.2 采用电磁波反射法、瞬变电磁法及直流电法进行超前地质预报时，宜考虑海底环境对探测距离及探测精度的影响。

5.3.8.3 电磁波反射法主要采用地质雷达法探测，适用于岩溶、断层破碎带、软弱夹层等不均匀地质体探测。采用地质雷达法探测时宜遵循以下要求：

- a) 在坚硬完整岩层探测距离不宜超过 30m，在泥质和软弱破碎地层、潮湿含水层地段的有效探测长度可根据雷达波形判定，连续预报时前后两次搭接不宜少于 5m；
- b) 采集数据时，宜根据探测对象的条件选取合适的天线工作频率，布设合理的测网并选取与之对应的时间窗口以及采样间隔；若探测对象情况复杂，宜选择两种及以上不同频率的天线，并根据数据采集中的干扰变化和效果及时调整工作参数，工作参数宜符合 JTJ/T 3222 相关规定；
- c) 预报资料解释前宜做编辑、滤波、增益等处理。资料处理时，宜选取结果清晰的雷达剖面，并结合地质情况、电性特征、探测体的性质和几何特征综合分析。

5.3.8.4 弹性波法主要采用地震波反射法和地震波反射层析成像法探测，适用于划分地层界线、探测不良地质体厚度和范围。采用弹性波法探测时宜遵循以下要求：

- a) 采用炸药或锤击震源时，在断层、软弱破碎地层或岩溶发育区，每次预报距离不宜超过 120 m；采用电火花震源时，在断层、软弱破碎地层或岩溶发育区，每次预报距离不宜超过 70 m；连续预报时前后两次搭接不宜少于 10 m；
- b) 地震波反射法数据处理时宜根据各反射层绝对波速和波速相对变化来确定不良地质位置、大小及范围；
- c) 地震波反射层析成像数据处理前宜根据现场测量数据建立三维几何模型，根据现场观测系统，将三分量地震数据转换到建立的坐标系中；根据各反射层绝对波速和波速相对变化，确定不良地质位置、大小及范围，并对围岩级别进行初步评估。

5.3.8.5 瞬变电磁法适用于不良地质段水体探测。采用瞬变电磁法探测时宜遵循以下要求：

- a) 瞬变电磁方法预报距离宜为 50 m~80 m，连续预报时前后两次搭接不宜少于 30 m；
- b) 采集数据时，宜结合现场地形、地质及物性条件选择观测装置及装置尺寸，并布置测线；数据采集宜采用多次叠加的方法，观测曲线出现畸变时可重复观测，并查明原因；
- c) 数据处理时，资料处理宜使用仪器配套的处理软件系统，地质异常体判断标准以现场多次采集分析验证的数据为依据，并符合 JTJ/T 3222 相关规定。

5.3.8.6 直流电法常采用激发极化法探测，适用于探查不良地质段的富水区位置及相对含水量大小等地质情况。采用激发极化法探测时宜遵循以下要求：

- a) 直流电法连续预报时前后两次搭接不宜少于 10 m，每次预报距离不宜超过 30 m；
- b) 采集数据时，宜根据隧道结构及现场施工情况，设计合适的观测系统，确定供电电极和测量电极的位置，隧道环境复杂时，观测系统设计可根据具体情况调整；数据采集出现干扰数据、突变数据时，可进行多次重复观测，取其常见值作为最终观测结果；
- c) 数据处理时，宜结合隧道地质勘察、设计、试验、监测等资料，对地质分析结果、反演结果、视极化率、半衰时曲线等进行综合解释。

5.3.9 超前钻探法

5.3.9.1 穿越赋水软弱断层破碎带、赋水岩溶发育区、潜在海水连通区及重大物探异常区等地质条件复杂地段宜实施超前钻探，钻孔前应根据预计水压安装孔口止水装置。

5.3.9.2 超前钻探法适用于海底隧道各种不良地质的施工期地质预报，包括取芯钻探、冲击钻探等钻探方法。钻探方法选取宜依据以下原则：

- a) 地层特点和钻探方法的相关性；
- b) 能保证以一定的精度鉴别地层，了解地层赋水情况；
- c) 避免或减轻对取样段的扰动影响。

- 5.3.9.3 超前钻探宜针对断层破碎带、海底风化槽等不良地质构造，根据其规模与复杂程度动态调控布孔方案、探测深度及搭接长度，并符合 DL/T 5783 相关规定。
- 5.3.9.4 钻探记录宜包含：回次进尺和深度、钻进情况、孔内情况、钻进参数、涌水情况、岩芯记录等内容。钻探记录和钻孔柱状图记录宜分别参照本文件附录 A、附录 B。
- 5.3.9.5 钻孔涌水时宜开展水质检测，包括氯离子浓度（Cl⁻）及全盐量等指标，判断钻孔揭露地层与海水的连通性。
- 5.3.9.6 钻探过程宜搭建超前钻探信息化采集与融合分析系统，采集钻进速度，钻杆推力、扭矩等随钻数据，判定前方围岩特性和不良地质发育情况。

5.4 成果整理及反馈

- 5.4.1 宜构建超前地质预报多源信息融合分析平台，对地质调查、地球物理探测与超前钻探数据进行联合解译，综合判定不良地质信息。
- 5.4.2 海底隧道不良地质超前预报工作完成后，应评估坍塌、涌水突泥等不良地质灾害发生风险，风险评估宜参照 JT/T 1375.3 中关于钻爆法施工隧道重大风险源风险估测的相关要求，并按照表 2 对灾害发生的可能性等级进行划分，为不良地质灾害治理方案的制定提供依据。

表2 海底隧道不良地质灾害风险事件可能性等级

可能性等级描述	等级
很可能	5
可能	4
偶然	3
可能性很小	2
几乎不可能	1

- 5.4.3 海底隧道不良地质超前预报工作完成后，应编写不良地质超前预报成果报告，报告内容应包含工作概况、采用的预报方法、预报结果、灾害风险评估结果、施工建议及下一步预报工作计划等。
- 5.4.4 预报成果整理完成后，及时向有关单位反馈；发现可能危及施工安全或造成重大环境灾害的断层破碎带、风化槽、岩溶等不良地质后应及时预警。
- 5.4.5 施工过程中可将实际开挖的地质情况与预报结果进行对比分析，及时总结经验教训，指导和改进地质预报工作。

6 控制技术

6.1 目的

不良地质是海底隧道建设的潜在危害，影响隧道施工安全，因此需要根据不良地质类型、范围、围岩质量等条件选定合适的灾害控制技术，控制目的包括：

- a) 提升围岩抗渗性能，封堵地层中主要导水通道，切断上覆海水与海底隧道间的水力联系；
- b) 提高围岩承载能力与稳定性，保障海底隧道工程建设及长期运营安全。

6.2 方案

6.2.1 实施不良地质治理前，宜编制不良地质灾害治理方案，方案内容宜包含：工程概况、编制依据、治理目的及范围、治理方法及参数设计、施工材料、工艺流程及操作要点、组织机构、投入人力与设备资源、质量要求与安全措施、效果检查及反馈等。

6.2.2 不良地质灾害治理方案宜区分陆域段与海域段，陆域段可采用地表与洞内联合的治理方法，海域段宜选用洞内治理。

6.2.3 治理参数设计及施工材料选取，宜考虑海水环境对工程建设材料使用及长期性能的影响。

6.3 材料

6.3.1 超前锚杆可选用金属锚杆、玻璃纤维锚杆等。选用金属锚杆时，砂浆保护层厚度不宜小于 20 mm，并对锚杆止浆塞与垫板之间无法采用砂浆保护的部位进行防腐处理。

6.3.2 超前小导管宜选用直径为 42 mm~50 mm 的无缝钢管，超前管棚宜选用直径为 80 mm~180 mm 的无缝钢管。使用前，宜根据水中 Cl^- 、 SO_4^{2-} 浓度，选用表面镀锌、涂刷防腐层等方法对钢管进行防腐处理。

6.3.3 注浆材料宜选用以水泥为主剂的浆液。选用的水泥品种，宜根据注浆目的、地质条件和海水侵蚀作用的强弱等因素确定，并依据下列原则：

- a) 常规条件下可采用硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥或复合硅酸盐水泥等；
- b) 当有抗侵蚀要求或其他特殊要求时，宜选用硫铝酸盐水泥、海工水泥等特种水泥；
- c) 浆液配合比设计应根据工程要求、水文地质情况确定，施工前宜进行配比试验。
- d) 外加剂应根据工程地质条件、水文环境及注浆工艺要求选择，宜采用减水剂、速凝剂、膨胀剂等类型，其性能应满足设计要求，与主材相容性良好，并符合国家现行环保标准，并通过试验确定种类及掺量。

6.4 方法

6.4.1 宜考虑灾害类型及风险等级，并按表 3 选取不良地质治理方法。

表3 海底施工风险等级划分及治理方法

风险类别	风险等级	治理方法
坍塌	2级及以下	/
	3级	超前小导管、超前锚杆
	4级	超前小导管、超前管棚、超前锚杆
	5级	掌子面支护、超前小导管、超前管棚、超前锚杆
涌水涌泥	2级及以下	/
	3级	注浆、超前小导管、超前管棚
	4级	周边或全断面帷幕注浆、掌子面支护
	5级	全断面帷幕注浆、掌子面支护

6.4.2 采用超前锚杆时宜遵循下列原则：

- a) 超前锚杆杆体直径宜为 22 mm~28 mm，自进式锚杆杆体直径宜为 28 mm~76 mm；
- b) 超前锚杆长度宜为 3 m~5 m，具体长度可根据钢拱架间距及纵向搭接长度确定。自进式锚杆长度宜为 5 m~10 m，实际长度宜根据地质条件确定；
- c) 锚杆的环向间距宜为 0.3 m~0.4 m，实际间距可根据地质条件确定。

6.4.3 采用超前小导管时宜遵循下列原则：

- a) 超前小导管长度宜为 3 m~5 m，实际施工长度可根据钢拱架间距及纵向搭接长度确定；
- b) 超前小导管环向设置间距宜为 0.3 m~0.4 m，外插角宜采用 $5^\circ \sim 12^\circ$ ；
- c) 超前小导管设置范围宜为衬砌中线两侧 $60^\circ \sim 75^\circ$ 区域；
- d) 小导管管壁应设置注浆孔，孔径宜为 6 mm~8 mm，间距宜为 0.15 m~0.25 m，呈梅花形布置。

6.4.4 采用超前管棚时宜遵循下列原则：

- a) 管棚环向间距宜为 0.35 m~0.5 m, 管棚一次支护长度宜为 16 m~40 m, 两次管棚支护间、管棚与其他超前支护间水平搭接长度不宜小于 3.0 m;
 - b) 管棚宜沿海底隧道开挖轮廓线外 0.1m~0.2 m 布设, 外插角可采用 1° ~ 3° ;
 - c) 管棚钢管就位后, 应插入钢筋笼, 并应及时进行注浆施工, 每根钢管应一次连续注满砂浆, 砂浆强度等级不应低于 M20;
 - d) 管棚管壁可布置注浆孔, 注浆孔孔径 6 mm~10 mm, 间距 0.2 m~0.3 m, 呈梅花型布置, 尾部宜预留 3 m~4 m 的无孔止浆段;
 - e) 管棚的注浆扩散半径可按 0.5m~0.6 m 计算, 注浆终压不宜大于 2.0 MPa, 并根据地质条件及施工情况确定;
 - f) 超前管棚可与超前小导管联合使用。
- 6.4.5 采用掌子面支护方法时宜遵循下列原则:
- a) 在软弱围岩、破碎围岩地段、掌子面容易出现掉块时, 可采用喷射混凝土封闭掌子面, 喷射混凝土厚度不宜小于 80 mm, 必要时设钢筋网;
 - b) 在掌子面易发生出现较大涌水、涌泥灾害时, 可采用混凝土封堵墙封闭掌子面, 封堵墙厚度根据掌子面大小、涌出压力、需封堵时间确定, 不宜小于 0.5 m, 必要时设钢筋网;
 - c) 掌子面支护宜与超前小导管、超前锚杆、超前管棚等方法联合使用。
- 6.4.6 采用注浆加固时宜遵循下列原则:
- a) 注浆前, 宜设置探查孔, 查明地层水质、离子浓度及地层渗透性;
 - b) 钻孔布置宜采用梅花形, 钻孔间距设计宜考虑地层特性及海水环境对注浆材料扩散范围的影响, 一般可取 0.6 m~1.8 m;
 - c) 注浆材料、注浆量和注浆压力宜考虑离子浓度、地层及浆液渗透特性, 宜经现场试验后确定;
 - d) 注浆时宜根据地层条件选择高效、精准的注浆施工工艺;
 - e) 注浆施工过程中, 宜采取措施防止浆液泄露, 减少环境污染;
 - f) 施工场地排水系统应畅通, 废浆排至沉淀池处理, 废水经处理达标后排放。
- 6.4.7 超前帷幕注浆适用于海底隧道穿越涌水量较大、涌泥或坍塌风险较高的断层破碎带、风化槽、岩溶的超前加固与止水。采用超前帷幕注浆时遵循下列原则:
- a) 帷幕注浆宜根据地质条件、渗涌水程度及不良地质段纵向长度等因素, 选用全断面帷幕注浆或周边帷幕注浆等方案;
 - b) 帷幕注浆范围宜按 JTG/T D70 执行;
 - c) 帷幕注浆孔宜按伞形呈辐射状布置, 钻孔布置成一圈或数圈, 内外圈按梅花形排列, 注浆的设计参数宜按 JTG/T 3371 的要求执行;
 - d) 超前帷幕注浆顺序宜按“由外到内、自下而上、隔孔跳排”的原则施作;
 - e) 帷幕注浆终止压力宜为静水压力 2 倍~3 倍, 最大可达 3 倍~5 倍;
 - f) 掌子面稳定性差、涌水量大时, 第一循环帷幕注浆前宜采用混凝土封堵墙封闭掌子面。混凝土封堵墙应安全稳定, 注浆时无漏浆、漏水现象。
- 6.5 效果检查与反馈
- 6.5.1 超前锚杆、超前管棚及超前小导管的施工质量及控制标准宜按 JTG/T 3660 的要求执行。
- 6.5.2 周边或全断面帷幕注浆结束后, 宜按 JTG/T D70 采用检查孔法及压水法对注浆效果进行检查和评定, 不合格时及时补充钻孔注浆。注浆强度达到设计强度的 70%后, 且检查孔出水量和压力满足设计时, 方可进行隧道开挖。
- 6.5.3 不良地质治理效果未达到预期时, 应及时对治理方案、材料性能、工艺技术等进行梳理、改进。
- 6.5.4 治理工作完成后, 宜编写不良地质治理效果评估报告, 报告内容包含: 工作概况、效果检查方

法及结果、开挖阶段围岩稳定性及涌水情况、施工建议等。报告整理完成后，及时向有关单位反馈。

7 监控量测

7.1 目的

7.1.1 基于监控量测数据，分析和预测隧道及周边围岩的安全状态及其发展趋势，保障海底隧道工程建设安全。

7.1.2 为优化不良地质灾害预控方案设计和施工参数提供依据。

7.2 方案

7.2.1 海底隧道不良地质段监控量测是确保隧道自身及周边环境安全的重要措施。开展监控量测前，宜制订专项监控量测方案，方案内容包含：工程概况、编制依据、监测项目、监测点布置、监测频率、监测方法、控制基准、组织机构、投入人力与设备资源、质量要求与安全措施、监测成果整理及反馈等。

7.2.2 海底隧道不良地质段监控项目、监测布置、监测频率及监测方法，应根据隧道埋深、工程地质条件、水文地质条件、断面形状及尺寸和施工方法等因素综合确定。

7.2.3 海底隧道不良地质段监控量测宜搭建信息化监控量测系统，优先选用高自动化程度、长寿命、高精度监测设备。

7.3 监测项目

7.3.1 海底隧道不良地质段监控量测项目可分为变形监测、应力监测及地下水监测。监测项目见表 5。

表4 监测项目

类别	监测内容	项目选择性
变形监测	拱顶下沉量测	必测项目
	洞内收敛量测	必测项目
	拱脚下沉量测	必测项目
应力监测	初期支护应力量测	选测项目
	二次衬砌应力量测	选测项目
	两层支护间压力量测	选测项目
	钢架内力及外力量测	选测项目
	围岩压力量测	选测项目
	锚杆轴力量测	选测项目
地下水监测	孔隙水压量测	必测项目
	水质监测	必测项目
	涌水量量测	必测项目
	二次衬砌水压量测	必测项目

7.3.2 根据工程需要和设计要求，海底隧道不良地质段宜设置变形监测、应力监测项目及地下水监测等项目。

7.4 监测布置

7.4.1 海底隧道不良地质段监测断面布置应考虑围岩级别、断面尺寸、开挖工法及不良地质灾害发生风险等因素，并按 JTG/T 3660 的要求执行。

- 7.4.2 拱顶下沉、洞内收敛、拱脚下沉等变形监测测点布置按 JTG/T 3660 的要求执行。
- 7.4.3 钢架内力及外力、围岩压力、锚杆轴力、支护及衬砌应力等应力监测测点布置按 JTG/T 3660 的要求执行。
- 7.4.4 孔隙水压力测点布置按 JTG/T 3660 的要求执行。
- 7.4.5 涌水量测点布置可根据现场实际情况而定，隧道表面涌水量较大的点可采取单点流量监测，并每隔 6h 取样进行水质监测。也可根据需要设置 1 个~3 个断面，进行区段涌水量监测，同时进行取样进行水质监测。

7.5 监测频率

监测频率可根据测点距掌子面的距离及围岩位移速度确定，并按 JTG/T 3660 的要求执行。

7.6 监测方法

- 7.6.1 变形监测可采用接触法量测或非接触法量测，并按 JTG/T 3660 的要求执行。
- 7.6.2 应力监测宜采用接触法监测，并按 JTG/T 3660 的要求执行。
- 7.6.3 孔隙水压监测可按 JTG/T 3660 的要求执行。
- 7.6.4 地下水水质、涌水量可根据监测方法选取相应仪器量测，并遵循下列原则：
 - a) 水质监测使用水样采集器进行收集，采样时尽量避免与大气相接触，每样约 5000 mL，采集完毕的水样宜尽快送至有专业检测资质的实验室进行检测，并结合 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Na^+ 等离子浓度检测结果，分析地下水离子浓度对工程建设材料性能的影响；
 - b) 海底隧道涌水量监控可在施工期掌子面、排水沟采用三角堰、流量计等进行量测。
 - c) 水流量、水质监测数据结果可按本文件附录 C 记录。

7.7 成果整理及反馈

- 7.7.1 监测数据应及时分析、处理，并绘制时态曲线图及距掌子面距离变化曲线图。
- 7.7.2 数据整理时，可依据时态曲线进行回归分析，并预测可能出现的最大值和变化速度，掌握数据变化的规律。
- 7.7.3 宜根据围岩及初期支护累计变形量、位移速率、位移速率变化趋势，及支护结构承受的应力、内力、压力值等参数综合判别围岩稳定性。
- 7.7.4 围岩稳定性的综合判别，应根据监控量测结果可按 JTG/T 3660 的要求执行。
- 7.7.5 二次衬砌水压力控制值陆域段为 50kPa、海域段为 100kPa，水压力大于等于控制标准的 85% 时，应跟踪监控；压力大于水压力控制值时，应采取泄压等应急措施。
- 7.7.6 水流量监测超过限排标准时，应立即停工，加强排水系统抽排能力，并采取合适的涌水封堵措施。
- 7.7.7 监测数据超出控制值时应及时发出预警、分析原因，提出对策和建议，并及时向有关单位反馈。

附 录 A
(资料性)

超前地质预报钻探施工记录表

超前地质预报钻探施工记录应按表A. 1填写

表 A. 1 超前地质预报钻探施工记录表

工程名称:			孔口位置			日期:		
钻孔编号	开孔时间	终孔时间	钻孔深度(m)	钻进速度(m/min)	钻进压力(MPa)	岩性描述	水质、水量描述	钻进情况描述
1								
2								
3								
4								
5								
操作: 技术负责: 记录: 复核: 完成单位:								

注：钻孔情况应包含冲洗液颜色、涌砂、空洞、震动，卡钻位置，突进里程，冲击器声音变化，断层、溶洞充填等描述。

附 录 B
(资料性)
钻孔柱状图记录表

超前地质预报钻探施工记录应按表B. 1填写

表 B. 1 钻孔柱状图记录表

工程名称：				钻孔编号：				
开孔时间：				孔口位置：		立角：		
终孔时间：						偏角：		
地层时代	开孔里程 (m)	终孔里程 (m)	柱状图 (比例)	采样位置	工程地质简述	出水位置	出水量 (m³/h)	备注
完成单位名称：				编写：	复核：	日期：		

附录 C
(资料性)
水流量、水质监测表

水流量、水质监测监测记录应按表C. 1填写

表 C. 1 水流量、水质监测表

隧道涌水流量监测						
监测位置			监测时间			
隧道出水量	单个湿渍的最大面积:		总湿渍面积:			
	每100 m ² 的渗水量:		整个工程平均渗水量:			
	单个漏水点的最大漏水量:	L/d	整个工程平均出水量:		L/ (m ² • d)	
含泥沙情况						
隧道水样质量监测						
采样时间	采水量	水样采集位置	主要离子含量			
			Na ⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
检测结果描述:						
现场采样人:		计算人:		校核人:		
监测项目负责人:		水样质量检测单位:				