

《海底隧道不良地质灾害预控技术指南》

（报批稿）编制说明

标准编制组

二〇二六年一月

目 录

- 一、工作简况 1
- 二、标准制定的目的和意义 4
- 三、标准编制的原则和依据 5
- 四、试验验证的分析、综述报告，预期的经济、社会效益 18
- 五、与现行相关法律、法规、规章和其他标准的关系 20
- 六、重大分歧意见的处理过程、处理意见及其依据 20
- 七、公平竞争审查结论 20
- 八、实施地方标准的措施建议 20
- 九、涉及专利的有关说明 21
- 十、其他需要说明的内容 21

一、工作简况

（一）任务来源

根据山东省市场监督管理局关于印发 2023 年度标准化创新发展计划项目的通知（鲁市监标函【2023】246 号），《海底隧道不良地质灾害预控技术指南》列入 2023 年度标准化创新发展计划项目。

（二）起草单位

本技术指南的第一起草单位为山东大学，参加起草单位是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、山东交通学院等，起草单位联合行业领域内的知名专家共同成立指南编制小组。

主要起草人有张庆松、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。

（三）起草过程

本技术指南第一起草单位山东大学是由中华人民共和国教育部直属，中央直管副部级建制的全国重点大学，位列世界一流大学建设高校（A 类），具有完善的研究条件。山东大学拥有全国重点实验室 7 个、国家工程技术研究中心 3 个、国家工程实验室 3 个、国家工程研究中心 2 个，共计国家级科研平台 15 个，是地下工程重大地质灾害防控领域重点院校。近年来研究团队承担了国家 973 计划“深长隧道突水突泥重大灾害致灾机理及预测预警与控制理论”、国家重点研发计划“海底隧道建造与韧性增强关键技术”等国家/省部级重点科研项目 200 余项。研究团队拥有完善的各类试验条件及扎实的理论知识储备。以青岛海底隧道为依托，参与青岛地区多项断裂带灾害勘探预测治理全过程，通过勘察预报、理论分析、数值模拟和材料性能测试试验以及大量的现场试验等手段，对不同海底隧道灾害预报、地质分析、监控量测、灾害处置的规律进行总结归纳，形成了一系列创新科技成果。

中铁第四勘察设计院集团有限公司是世界 500 强企业，是国家认定企业技术中心及国家委托铁路、城市轨道交通专业投资咨询评估单位，综合实力位居全国勘察设计百强前列。作为国际工程咨询工程师联合会（FIDIC）团体会员，经营足迹遍及五大洲 20 多个国家和地区。荣获“全国先进基层党组织”、“全国文明单

位”、“全国五一劳动奖状”、“中央企业先进集体”、“全国优秀勘察设计院”、“中国 AAA 级信用企业”、“全国守合同重信用单位”和“全国文明诚信示范单位”等荣誉。

青岛国信发展（集团）有限公司是国内海底隧道建设领域的龙头企业之一，主持建成了青岛首条海底隧道-胶州湾隧道，并承担了隧道运营期养护任务。具有与本研究相关良好的软硬件条件和丰富的工程实践经验。近年来青岛国信发展（集团）有限公司先后承担了地下工程承压地下水的控制与防治技术研究、复杂条件下隧道施工地质预警等国家重点项目课题；成功建设并运营了胶州湾海底隧道，积累了丰富的海底隧道建设技术经验；先后获得中国公路学会科技进步特等奖、中国土木工程詹天佑奖、中国建筑工程鲁班奖。公司在科研投入、创新课题研究、知识产权保护、科研成果转化上积累了大量经验，在海底隧道建设新材料、新工艺、新设备研发，维养运营等方面已经形成产业优势。

山东建筑大学拥有土木工程国家级实验教学示范中心、国家级虚拟仿真实验教学中心、山东省工程结构与防灾减灾重点实验室、山东省高校道路与交通工程重点实验室、山东省绿色建筑协同创新中心、山东省土木结构诊断改造与抗灾工程技术研究中心等科研平台，先后承担了包括 973 项目、国家重点研发计划项目在内的 300 余项科研课题，荣获省部级以上科技奖励近 50 项。学校各实验室配备了系统的试验仪器，如 WDW-100E 电子万能试验机、NKYS-W500 电液伺服岩石直剪仪等、KH-7700 数字式三维视频显微镜、S-3400 N 扫描电镜、XTH320LC 型扫描仪、HPC 集群平台以及前后处理系统等。

山东交通学院拥有 1 个全国交通运输行业重点实验室、1 个工信部实验室（山东）、1 个省重点实验室（筹）、3 个省级工程技术研究中心、5 个省级工程研究中心等省部级科研平台 11 个，2 个省高校协同创新中心、5 个省高等学校实验室、2 个省高等学校工程研究中心、1 个省海洋工程技术协同创新中心、1 个省重点行业领域事故防范技术研究中心（交通运输行业）、3 个省大数据发展创新实验室、7 个省交通运输行业重点实验室。近五年，主持纵向课题约 700 项，纵横向科研经费累计 6.7 亿余元。学校实验中心拥有大型地质力学模型实验室、流体力学、及水力学实验室、岩土力学实验室和数值仿真实验室四个实验平台，配备有 Brookfield 旋转式流变仪（RST）、扫描电镜、X 衍射仪、结构加载试验

系统（MTS）、大型结构加速加载试验系统（ALT）等先进试验设备。

1. 成立标准研制工作组

由山东大学、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、山东交通学院等单位联合开展本指南的编制，成立指南编制小组

2. 相关标准资料搜集

指南编制小组搜集整理了国家、省相关的政策文件，收集分析了《岩土工程勘察规范》（GB 50021）、《岩土工程勘察安全规范》（GB 50585）、《城市轨道交通岩土工程勘察规范》（GB 50307）、《城市轨道交通工程监测技术规范》（GB 50911）、《公路水运工程施工安全风险评估指南》（JT/T 1375.3）、《公路工程物探规程》（JTG/T 3222）、《公路隧道施工技术规范》（JTG/T 3660）、《公路水下隧道设计规范》（JTG/T 3371）、《公路隧道设计细则》（JTG/T D70）、《注浆技术规程》（YS/T 5211）、《水电水利地下工程地质超前预报技术规程》（DL/T 5783）、《公路隧道施工地质预报技术规范》（DB41/T 2139）、《公路隧道监控量测技术规程》（DB53/T 1033）、《公路隧道超前地质预报技术规程》（DB51/T 2792）、《工程物探技术标准》（DG/TJ08-2271）、《城市工程地球物理探测标准》（CJJ/T 7）、《铁路隧道超前地质预报技术规程》（Q/CR 9217）、《铁路隧道监控量测技术规程》（Q/CR 9218）等标准文件，初步确定了标准框架。

3. 确定标准框架、形成标准初稿

通过调研海底隧道超前地质预报及灾害控制应用现状，结合已有的海底隧道建设相关材料和标准，按照《标准化工作导则 第1部分：标准的结构与编写》（GB/T 1.1-2020）的要求，起草完成《海底隧道不良地质灾害预控技术指南》初稿，主要包括范围、规范性引用文件、术语和定义、总则、超前地质预报、控制技术、监控量测、附录等章节。

4. 初稿审查

2024年10月25日，山东省交通运输厅在济南组织召开了《海底隧道不良地质灾害预控技术指南》山东省地方标准专家审查会议。来自济南城建集团有限公司、山东省交通规划设计院集团有限公司等单位共7名专家组成了审查委员

会。审查委员会听取了标准编制情况汇报，对标准文本进行了逐章、逐条审查，对标准编制说明等进行了审查。会议一致同意该指南通过初稿审查。

5. 征求意见

2025 年 1 月至 2 月，指南编制工作组公开发出指南征求意见函 30 份，收到回函 22 份，逐条回应各方建议，最终修订形成标准送审稿，完成征求意见阶段工作。

6. 送审稿审查

2025 年 12 月 25 日，山东省交通运输厅在济南组织召开了《海底隧道不良地质灾害预控技术指南》山东省地方标准专家审查会议。来自交通运输部公路科学研究院、济南大学等单位共 7 名专家组成了审查委员会。审查委员会听取了标准编制情况汇报，对标准文本进行了逐章、逐条审查，对标准编制说明等进行了审查。会议一致同意标准通过审查，并要求起草单位尽快形成报批材料后上报省市场监管局。

二、标准制定的目的和意义

2019 年 9 月 19 日，中共中央、国务院印发了《交通强国建设纲要》，纲要指出：到 2035 年，基本建成交通强国，形成三张交通网、两个交通圈。2021 年 7 月 19 日，山东省人民政府正式印发《山东省“十四五”综合交通运输发展规划》，规划提出：到 2025 年，交通强省建设取得重大突破，山东在交通强国建设新征程中走在全国前列，初步建成安全、便捷、高效、绿色、经济的现代化综合交通运输体系，沿黄达海、连通全球的双循环战略支点作用充分发挥，成为东北亚乃至“一带一路”的综合交通枢纽。2021 年 10 月 26 日，山东省人民政府办公厅关于印发《山东省“十四五”海洋经济发展规划》，要求继续加快沿海地区基础设施建设，加快构建高效疏运网络，大幅提升航运综合服务能力。

山东省地处我国东部沿海，海岸线绵长，胶东地区是环渤海经济区的海上门户，海峡阻隔对区域经济影响大，海底隧道的建设将有力促进区域间经济合作交流、加快山东半岛蓝色经济区建设。目前，山东省在海底隧道建设方面已走在了全国前列，已建成海底隧道 3 条：胶州湾海底隧道、青岛地铁 1 号线海底隧道和青岛地铁 8 号线过海隧道；在建海底隧道 1 条：胶州湾第二海底隧道；此外，渤海海峡跨海通道也已纳入山东省“十四五”发展规划和《山东省综合交通网中长期

发展规划》。与陆域隧道不同，海域隧道勘查困难，建设风险高；上覆海水无限补给，危害巨大，一旦发生突涌水、坍塌等灾害，将造成严重的海底隧道工程事故。

目前，国家标准中《岩土工程勘察规范》（GB 50021）、《岩土工程勘察安全规范》（GB 50585）涉及陆域隧道勘查阶段的钻探以及地球物理勘探，该标准主要以陆域隧道为对象，然而海底隧道较陆域隧道存在如地质构造复杂多变、上覆海水无限补给等特殊之处。地方标准中，《公路隧道监控量测技术规程》（DB53/T 1033）对钻爆法施工的陆域隧道监控量测项目、频率及精度、量测方法等做出了规定。企业标准中，《铁路隧道监控量测技术规程》（Q/CR 9218）对矿山法修建的铁路隧道过程中的监控量测项目、测点布置原则、监测频率以及其控制基准做出了规定。此外，各地方标准体系中各规范仅针对陆域隧道建设期某一阶段或某种特定地质条件做出规定，尚没有提出针对海底隧道断层破碎带、风化槽等不良地质引发的坍塌、突涌水灾害的全过程处理方法。

因此，对于海底隧道不良地质灾害的规定属于现阶段标准体系中的空白区域。对于山东省内海底隧道，缺少针对不良地质灾害预控技术规范。本技术指南参考了相关标准，针对海底隧道不良地质灾害预控技术进行了程序化技术规范。

编制组历经多年的技术研发，依托青岛地铁1号线海底隧道、青岛地铁8号线过海隧道、胶州湾第二海底隧道等建设工程进行技术攻关，对多项海底隧道不良地质灾害预控技术进行了总结，联合山东大学、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、山东交通学院等单位，计划编制《海底隧道不良地质灾害预控技术指南》。

新技术指南的制定和实施，将为海底隧道不良地质灾害的超前地质预报、预防控制及监控量测等工作，提供有力的技术支撑和规范化的参考依据，助力加快实现山东省海底隧道不良地质灾害预控技术的标准化。

三、标准编制的原则和依据

（一）标准编制原则

本指南的制定严格遵循《山东省地方标准管理办法》《山东省工程建设标准化管理办法》（山东省人民政府令第307号）等相关规定，同时兼顾技术特性与编写规范，确立以下编制原则，确保指南合法合规、科学适用、衔接统一。

在核心技术与管理层面，遵循以下原则：一是合规性原则，严格恪守国家及山东省相关法律、法规、规章和技术经济政策；二是适配性与经济性原则，坚持安全适用、经济合理，充分结合山东省本地气候、地理、环境等区域特点；三是先进性原则，技术要求不低于现行国家标准和行业标准；四是知识产权合规原则，采用专利技术的，须事先取得专利权人许可；五是成熟性原则，以成熟的工程建设或产品生产实践经验为支撑；六是成果转化原则，拟纳入标准的科技成果须已通过验收或鉴定，且具备推广应用条件；七是协调性原则，与现行有效相关标准协调配套，避免冲突重复。

在文本编写层面，严格遵循一致性、规范性、实用性三大原则，具体如下

1. 一致性原则

标准的总体技术路线及相关条款内容遵循了《水电水利地下工程地质超前预报技术规程》（DL/T 5783）、《公路水运工程施工安全风险评估指南》（JT/T 1375.3）、《公路工程物探规程》（JTG/T 3222）、《公路隧道施工技术规范》（JTG/T 3660）、《公路水下隧道设计规范》（JTG/T 3371）、《公路隧道设计细则》（JTG/T D70）、《注浆技术规程》（YS/T 5211）等相关规范/标准中对于地下工程防灾减灾及防护领域的有关规定和要求，确保标准内容与相关文件要求的一致性。

2. 规范性原则

本标准按照《标准化工作导则 第1部分：标准的结构和编写规则》（GB/T 1.1-2020）的要求进行编写，保证标准形式和内容的规范性。结构上主要包括封面、目次、前言、范围、规范性引用文件、术语和定义、总体原则、超前地质预报、控制技术、监控量测、附录等内容。

3. 实用性原则

本文件的编写充分依托了青岛地铁1号线过海隧道、青岛地铁8号线过海隧道及正在建设的胶州湾第二海底隧道，结合海洋工程地质与水文地质的复杂性和特殊性，重点关注海底隧道不良地质超前预报和控制技术的规范性，以保证海底隧道建设的安全性与经济性。

（二）标准编制内容与确定依据

标准在编制过程中，结合海底隧道穿越不良地质段预控的工程实际，重点引

用和参考了公路隧道设计与施工、铁路隧道设计与施工、水利水电地下工程设计与施工其他地市隧道超前地质预报设计及施工等相关法律法规、政策文件、技术指导、标准、文献等。

《海底隧道不良地质灾害预控技术指南》在充分借鉴已有标准的基础上，广泛调研，并征求有关专家的意见后，确定标准主要框架，共分为 7 章，主要从范围、规范性引用文件、术语和定义、总体原则、超前地质预报、控制技术、监控量测等方面对海底隧道不良地质灾害预控技术进行规范。

1. 范围

海底隧道建设同时面临上覆无限海水与复杂多变地质条件等严酷环境。隧道施工穿越断层破碎带、风化槽、岩溶等不良地质时，施工扰动极易诱发坍塌、涌水涌泥等重大不良地质灾害。若不良地质体与海水直接连通，甚至会引发海水倒灌、隧道淹没等毁灭性事故，严重威胁工程建设及人员安全。为系统规范钻爆法施工海底隧道的超前地质预报、预控技术措施及监控量测工作，实现对不良地质的超前判识与主动防控，有效避免或降低不良地质对隧道施工的影响，保障海底隧道工程建设安全与质量，特制定本指南。

2. 规范性引用文件

本规范所引用的国家、行业和地方有关规范、规程、标准均为现行且有效的，文中给出编号，以便于使用时查找。

3. 术语和定义

本编制组结合国内标准和资料，对不良地质灾害、预控、注浆进行了定义，便于标准应用者理解和应用。

4. 总体原则

4.1 海底隧道建设相较于陆地隧道工程，面临更为复杂和严峻的环境挑战，主要体现在无限补给的海水环境与复杂多变的海底地质条件。面对上述挑战，在海底隧道穿越不良地质段时有必要采取系统化的预控措施。通过超前探测、超前治理、实时监测等手段，形成完整的风险防控体系，有效降低坍塌、涌水涌泥等事故的发生概率，保证施工人员和设备安全，最终保障海底隧道建设全过程的安全。

4.2.1 b) 在海底隧道不良地质灾害预控工作中，优先采用自动化、智能化新

技术可以提升作业精度与可靠性、增强施工安全保障、提高工作效率、实现实时监测与预警。

在钻孔施工中，可优先采用智能随钻监测系统，实时采集钻进速度、钻杆推力、扭矩、转速等参数，通过数据分析辅助识别前方围岩特性、不良地质发育情况。

在注浆施工中，可优先采用智能注浆控制系统，实时监测注浆压力、流量、等参数，根据地质条件和注浆效果自动调整注浆参数，实现精准注浆。可优先采用配备自动配料、自动搅拌、自动输送的一体化注浆设备，减少人工操作环节，提高注浆质量和效率。

在监控量测作业中，宜优先采用无线传输、低功耗、高精度的自动化监测传感器，同时构建覆盖全隧道的监测网络，以实现变形、应力、渗压等参数的实时自动采集。通过智能预警与决策支持系统，实现异常情况的自动识别、分级预警和处置建议。

4.3 在海底隧道穿越不良地质段的施工过程中宜严格遵循超前地质预报在前，超前治理在后，监控量测贯穿预控流程的原则。超前地质预报是预控工作的起点和基础，只有通过准确的地质预报，才能提前识别风险，为后续治理措施提供科学依据。超前治理是基于预报结果采取的主动预防措施。合适的控制技术可以将由不良地质引起的坍塌、涌水涌泥等灾害消除。监控量测贯穿于整个预控流程，可用于验证超前治理的效果，也可用于监测施工过程的安全状态，还可为应急响应提供预警信息。

5. 地质超前预报

5.3.2 海底隧道施工条件复杂，超前地质预报所面对的地质对象具有显著的隐蔽性和不确定性，不同预报方法在探测原理、适用条件、探测范围及精度等方面均存在差异。因此，超前地质预报方法的选择需综合考虑工程条件、不良地质类型、预报目的及预报范围等因素。工程条件直接制约预报方法的可实施性和安全性，不同工法对预报手段的空间布设、作业时机及干扰容许度要求不同；不良地质类型决定了预报重点及敏感参数，不同方法对断层破碎带、海底风化槽、岩溶等地质体的识别能力存在差别；预报目的和预报范围则影响方法的分辨率要求和探测深度，单一方法往往难以同时兼顾宏观覆盖与局部精细识别。鉴于各类预

报方法均具有适用性与局限性，采用多种超前地质预报方法的组合，可以发挥不同方法在探测尺度、信息类型及精度方面的互补优势，通过多源信息的相互印证与综合分析，提高不良地质识别的可靠性与预报结果的准确性，从而为隧道施工安全与风险防控提供更为可靠的技术支撑。

5.3.3 由于不同预报方法在探测原理、敏感参数及适用尺度方面存在差异，本条依据预报目的，将不良地质信息划分为分布特征、围岩特征和赋水情况三类，并分别提出相应的预报方法选择原则。

对于不良地质的分布特征，包括类型、规模、位置及空间展布等，需重点获取其几何形态和空间连续性信息。地质调查法可提供宏观构造，电磁波反射法和弹性波法具有良好的空间成像能力，超前钻探法则可对关键部位进行直接揭示。

对于不良地质围岩特征，如岩性、强度、完整性、渗透性及围岩等级等，需获取具有工程意义的物理力学和结构信息。地质调查法能够提供岩性及构造的定性认识，超前钻探法可通过取芯、原位观测等手段获取直接、可靠的工程地质参数，适用于围岩特征的判识。

对于不良地质的赋水情况，包括富水区的位置、规模及水量等，需重点识别含水构造及其导水能力。瞬变电磁法和直流电法对介质电性差异较为敏感，适于探测富水异常区，超前钻探法则可对水量、水压等进行验证和补充。

5.3.4 根据多年来隧道施工地质超前预报的现状，长距离、中距离和短距离预报只是一个相对概念，没有一个准确的数据，习惯上，长距离预报达到 100m，中距离预报在 30m~100m，短距离预报在 30m 以内。

5.3.5 断层破碎带与海底风化槽通常表现为岩体破碎、结构松散、物性参数变化明显，其空间展布具有一定连续性和规模性，适宜采用地质调查法与地球物理探测方法进行综合识别。其中，电磁波反射法和弹性波法可反映围岩结构与完整性变化，瞬变电磁法对构造的富水性或充填物性质具有较好的响应特征，能够实现对不良地质的超前识别与空间定位；在此基础上，必要时辅以其他方法进行补充判识。

岩溶发育区的不良地质形态复杂，具有隐蔽性强、尺度差异大、空间分布不均匀等特点，单一方法难以全面反映其发育特征。地质调查法可用于分析区域岩溶发育条件及控制因素。电磁波反射法对介质界面和结构突变敏感，适用于探测

溶洞、溶蚀空腔及破碎带等导致电磁参数发生突变的岩溶体，弹性波法可通过波速、波阻抗及波场特征的变化反映岩体完整性和结构破坏程度，对空洞型、充填型及半充填型岩溶具有较好的识别效果；直流电法对地下介质电阻率差异敏感，能够有效反映含水岩溶、溶蚀通道及富水区等低阻异常体。而超前钻探法能够获取钻进响应和揭露信息，对关键部位的岩溶发育状况及赋水特征提供直接判识依据。因此，岩溶条件下宜采用多种方法组合实施，以提高预报的完整性和准确性。

5.3.6 地质调查是超前地质预报的基础工作。通过对区域与施工区段地层结构、不良地质发育规律及控制因素的调查分析，可明确预报重点区段和主要不良地质类型，形成对前方地质条件的宏观认识，为后续地球物理探测方法的选取、参数设置及成果解译提供必要的地质背景和判别依据。缺乏地质调查支撑，易导致物探方法选择失当或解译结果偏差。

地球物理探测具有探测距离长、覆盖范围广、施工干扰相对较小等特点，适宜在地质调查基础上开展。由于不同地球物理方法对介质结构、物性及含水特征的敏感性存在差异，采用两种或两种以上参数互补的方法进行组合探测，可相互印证异常特征，降低单一方法的不确定性，提高异常识别与空间定位的可靠性，并实现由宏观到中观尺度的逐步筛查。物探方法互补主要是指电磁与地震方法，两种互补物探方法进行预报可以排除干扰异常。

超前钻探具有直接揭露地层、获取钻进响应及赋水信息等优势，但施工成本较高、扰动性较强，且受施工条件限制明显。因此，本条明确将超前钻探布置于地球物理探测发现异常及地质条件复杂的区段，并按照循环作业方式实施，以实现关键风险区段的针对性判识和精细化掌控，避免盲目钻探带来的安全风险和资源浪费。

5.3.7.3 海底隧道勘察设计资料收集还应包括下列内容：

- 1) 区域性的地质、水文、气象。
- 2) 已发生的岩土工程事故案例，了解其发生的原因、处理措施和整治效果。

5.3.7.5 隧道内地质素描图的比例尺根据需要确定。洞内地质素描资料应及时反映在隧道工程地质平面图和纵断面图上并应分段完善、总结。

1 隧道内地质素描应包括下列工程地质内容：

- 1) 地层岩性：描述地层时代、岩性、层间结合程度、风化程度等；

2) 地质构造：描述褶皱、断层、节理裂隙特征、岩层产状等。断层的位置、产状、性质、破碎带的宽度、物质成分、含水情况以及与隧道的关系。节理裂隙的组数、产状、间距、充填物、延伸长度、张开度及节理面特征、力学性质，分析组合特征、判断岩体完整程度；

3) 坍塌：应记录坍塌部位、方式与规模及其随时间的变化特征，并分析产生坍塌的地质原因及其对继续前进的影响。

2 隧道内地质素描应包括下列水文地质内容：

1) 水的分布及围岩的透水性、水量、水压、水温、颜色、泥砂含量测定，以及活动对围岩稳定的影响，必要时进行长期观测；

2) 水质分析，判定水对结构材料的腐蚀性；

3) 出水点和地层岩性、地质构造；

4) 必要时进行相关气象、水文观测；

5) 必要时应建立突涌水点地质档案；

6) 水质有害元素含量。

3 隧道内地质素描应对围岩稳定性特征及支护情况进行描述：

1) 记录不同工程地质、水文地质条件下隧道围岩稳定性、支护方式以及初期支护后的变形情况；

2) 发生围岩失稳或变形较大的地段，详细分析、描述围岩失稳或变形发生的原因、过程、结果等。

5.3.8.1 地球物理探测法的应用还应符合下列条件：

1 干扰背景不影响有效信号的观测和识别；不利的地形、地物不致影响正常的推断、解释。

2 地质条件复杂的隧道和存在多种干扰因素的隧道，应根据被探测对象的物性条件开展综合物探，并与其他探测方法相配合，对所测得的物探资料进行综合分析。

5.3.8.2 海底隧道超前地质预报中，海水高盐环境对电磁波反射法、瞬变电磁法和直流电法的探测距离及探测精度存在一定影响，应在方法选择、布设设计及数据解释中予以考虑。电磁波反射法由于高频电磁波在海水中衰减迅速，其有效探测距离显著缩短，反射界面成像精度降低，应适当降低设计探测距离或谨慎使

用；瞬变电磁法受浅部高导电海水层影响，前方有效探测距离缩短，异常分辨率降低，应结合晚期信号调整探测参数与数据解释策略；直流电法整体探测距离变化较小，但海水背景降低异常对比度，应结合地质及水化学信息修正异常判识标准，以保证超前地质预报的可靠性。

5.3.8.3 在采用地质雷达法探测时，仪器技术指标及数据采集应符合下列要求：

1 地质雷达探测仪器的技术指标应满足下列要求：

- 1) 系统增益不应低于 150 dB。
- 2) 信噪比应大于 60 dB。
- 3) 采样间隔不应大于 0.5 ns、模数转换器不应低于 16 位。
- 4) 扫描速率应大于 8 scan（记录道）/s。
- 5) 连续工作时间不应小于 4 h。
- 6) 脉冲重复频率不应小于 100 kHz，模数转换精度不应低于 16 bit。
- 7) 应具有垂向滤波功能。
- 8) 水平定位误差 $\leq 1\%$ ，测深测量误差 $\leq 10\%$ （测深小于 0.1 m 时）。

2 地质雷达探测的数据采集应符合下列要求：

1) 测网密度、天线间距和天线移动速度应反映出探测对象的异常，测线宜采用十字或网格形式布设。

2) 掌子面超前地质预报常采用单点探测方式，同时可结合连续探测方式进行对比。

3) 测线上天线经过的表面应相对平整，无障碍，且天线易于移动；测试过程中，应保持工作天线的平面与探测面基本平行，距离相对一致；现场记录应注明观测到的不良地质体与水体的位置与规模等；重点异常区应重复探测，探测不一致数据不采用，采用其他手段进行探测。

4) 情况较复杂时，还宜进行道分析、F-K 滤波、正常时差校正、褶积、速度分析、消除背景干扰等处理；必要时应考虑影响介电常数的各种因素，制作雷达探测的正演和反演模型。

5.3.8.4 c) 应结合隧道勘察、掌子面附近的地质资料对不良地质信息做出解释和推断。可结合岩体泊松比等力学参数和围岩软硬、含水情况、构造影响程度、

节理裂隙发育情况等资料对围岩级别进行初步评估。

5.3.8.5 瞬变电磁法一般采用中心回线装置，其发射和接收装置主要技术参数如下：

1 瞬变电磁仪发射部分应具有过压和过流保护功能，其最大发射电流不低于 3A；其发射基频频率能在 2.5 Hz~225 Hz 范围内分档；最小关断时间不应大于 0.5 μ s；发射线圈最大边长不应大于 2 m。

2 瞬变电磁仪接收部分应其通道灵敏度不应大于 0.5 mV；最小叠加次数不应小于 1000，最大采样率不应小于 10 μ s；带宽不应窄于 10 Hz~7.5 kHz；最大时窗不应小于 160 ms，增益范围宜为 0 dB~140 dB；本底噪声应小于 1 μ V；工频干扰抑制宜大于 60 dB。

3 采用线框接收时应采用重叠回线装置，采用磁探头接收时应采用中心回线装置。测线布置应符合下列要求：

1) 相邻两次预报宜布置 30 m 的重叠洞段。

2) 水平测线宜以线框的法线方向与隧道左壁垂直为起点 (0°)，顺时针方向每 15°布置一个测点；当线框的法线方向与隧道开挖方向一致后 (90°)，每隔 0.5 m 布置一个测点；依次进行扇形扫描，直至线框的法线方向与隧道右壁垂直 (180°)；铅垂测线宜以线框的法线方向与隧道开挖方向呈 45°为起点，每隔 15°布置一个测点，直至线框的法线方向与隧道开挖方向呈 135°。

3) 掌子面水平测点间距宜为 0.5 m，扇形扫描角度间隔宜为 15°。

4) 岩体完整、低导电率和低导磁率的洞段宜每 80 m 预报一次；岩体破碎、含水率高、高导电率和高导磁率的洞段宜每 60 m 预报一次，弯曲段可适当减小预报距离。

5) 当地质条件复杂时，宜增加线框法线方向与隧道开挖方向呈上下或左右 30°、60°夹角的测试。

6) 单一或“十字”形测线布置时，进行各角度及多测线的相关解释，从而确定异常的范围和走向；多组测线测量时，应进行各角度三维相关解释，确定异常的范围和走向。

5.3.8.6 激发极化预报仪器的位测量电流误差不应大于 1%，分辨率不应低于 0.01 mA；其测量电压误差不应大于 1%，分辨率不应低于 0.01 mV。；输入阻抗

不应小于 20 MΩ；供电电极应采用具有一定直径和长度的金属电极；此外，激发极化法的测量电极应选用不极化电极。

5.3.8.6 b) 激发极化预报时，应优先选用聚焦测深观测装置，观测系统采用三极装置或二极装置。现场工作时，电极安装位置的允许偏差为±5 cm。在数据采集前测量接地电阻，检查电极与围岩的接触是否良好。

5.3.9 超前钻探是利用钻机在隧道开挖工作面进行钻探获取地质信息的一种超前地质预报方法。

5.3.9.2 超前钻探可采用冲击钻和回转取芯钻，并按下列要求二者合理搭配使用，提高预报准确率和钻探速度，减少占用开挖工作面的时间。

1 一般地段采用冲击钻。冲击钻不能取芯，但可通过冲击器的响声、钻速及其变化、岩粉、卡钻情况、钻杆震动情况、冲洗液的颜色及流量变化等粗略探明岩性、岩石强度、岩体完整程度。

2 复杂地质地段采用回转取芯钻。回转取芯钻岩芯鉴定准确可靠，地层变化里程可准确确定，一般只在特殊地层、特殊目的地段、需要精确判定的情况下使用。

不同钻进方法的选择可参考表 1。

表1 钻进方法的适用范围

钻进方法		钻进地层			勘察要求		
		砂土	碎石土	岩石	直观鉴别，采取不扰动试样	直观鉴别，采取扰动试样	不要求直观鉴别，不采取试样
回 转	螺纹钻探	△	-	-	○	○	○
	无岩芯钻探	○	△	○	-	-	○
	岩芯钻探	○	△	○	○	○	○
冲 击	冲击钻探	○	○	-	-	-	○
	锤击钻探	○	△	-	○	○	○
振动钻探		○	△	-	△	○	○
冲洗钻探		○	-	-	-	-	○

注：○代表适用；△代表部分情况使用；-代表不适用。

5.4.1 超前地质预报多源信息融合分析平台能够将地质调查、地球物理探测及超前钻探等方法产生的数据进行联合解译与综合分析，实现不同方法之间的互补考虑。通过融合分析，可充分利用各方法在空间覆盖、探测深度和异常识别特

性上的差异,提高不良地质体和潜在风险区的识别能力,并降低单一方法可能存在的漏判或误判,提升超前地质预报的精度与可靠性。平台能够对各类数据进行系统比对和空间关联分析,为不良地质治理及风险管理提供科学依据,实现风险预警。同时,随着施工进展和新数据获取,平台可动态更新分析结果,保持超前地质信息的完整性和时效性。长期应用还可形成系统的地质信息数据库,为后续施工及类似工程提供技术支撑和经验积累。

6. 控制技术

6.2.3 海底隧道施工材料长期处于高盐、高压等复杂环境,其性能劣化速度可能显著高于传统陆域隧道。海水中的 Cl^- 、 SO_4^{2-} 和 Mg^{2+} 渗会破坏水泥水化产物的稳定性,导致钢筋锈蚀和水泥结石体结构疏松,造成结构承载力下降和抗渗性能下降。因此在海底隧道建设过程中,宜考虑海底侵蚀环境,优先选择长期性能稳定的建筑材料,并在此基础上,兼顾技术可行性与经济合理性。

6.3.3 c) 已有研究表明,海水中的 Cl^- 、 Na^+ 、 K^+ 等离子对水泥基注浆材料的水化过程具有显著影响,通过参与水泥熟料的水化反应过程,起到促凝、提高早期强度的效果。其中, Cl^- 、 Na^+ 、 K^+ 等离子体的促凝效果,会显著降低注浆材料凝结时间、提高材料粘度,进而对注浆材料在地层中的扩散过程与扩散范围产生影响。因此,在注浆材料的选取与配合比设计中,需要考虑海底环境地下水中离子浓度对注浆材料凝结与流动性能的影响。避免因地下水中离子浓度变化及配合比设计不合理造成注浆效果不理想。

6.4.1 针对坍塌风险,超前小导管/锚杆能快速形成浅层支护拱,及时控制小范围坍塌风险,适用于局部、小范围、浅层围岩加固,可作为 3 级风险的坍塌灾害的控制技术。管棚可以形成钢拱架式预支护,与超前小导管、锚杆联合使用可以形成长短结合复合支护体系,能有效控制较大范围的坍塌,可作为 4 级风险的坍塌灾害的控制技术。掌子面支护作为应急稳定措施,直接稳定开挖面,再配合超前支护体系向前推进,形成"先稳后进"的安全施工模式,可作为 5 级风险的坍塌灾害的控制技术。

针对涌水涌泥风险,3 级风险为局部渗漏或小股涌水,可采用注浆直接封堵导水通道。也可利用超前小导管及超前管棚的二次注浆进一步封堵渗涌水,同时作为支护结构,可实现支护加止水双重功能。周边或全断面帷幕注浆可形成连续

止水帷幕，在开挖轮廓线外形成环状止水屏障，切断外围水源。同时采用掌子面支护可防止开挖面发生涌水涌泥，可作为 4 级风险的涌水涌泥的控制技术。当风险等级达到 5 级时，宜优先采取全断面帷幕注浆和掌子面支护对隧道整个断面及前方围岩进行全方位、高强度加固，避免涌水涌泥的发生。

6.4.2 当松散破碎围岩钻孔成孔性差时，可采用自进式超前锚杆。自进式锚杆尾端应支承在钢架上，应注入水泥浆，其强度等级不应低于 M20。

6.4.3 超前小导管具有管棚作用，比超前锚杆的支护能力强，比管棚简单易行，灵活经济，可以通过减小小导管纵向循环间距来增加小导管每循环间搭接长度，可起到双层小导管作用。当采用双层小导管加固时，两层小导管间距不宜大于 300 mm。

6.4.4 a) 管棚钢管环向间距视管棚支护段地质条件而定，保证两管不掉渣，在围岩情况较差的地段，环向间距应取小值。管壁注浆小孔能使部分浆液渗透到围岩体内，对加固围岩和提高围岩的自稳能力可起到一定作用。

6.4.4 d) 钢管尾端有不钻孔的止浆段，止浆段为伸入岩体内 1.0 m~2.0 m 范围，止浆段与外露段不钻孔。

6.4.6 b) 非均匀地层如上软下硬、含水层与隔水层互层。通过调整不同分段的技术参数，可以有针对性地对薄弱层位进行加强注浆。

6.4.7 c) 注浆孔的布置是根据浆液的注浆有效范围，且应相互重叠，使被加固土体在平面和深度范围内连成一个整体的原则决定的。当单排孔不能满足设计厚度的要求时，就要采用两排以上的多排孔。多排孔设计的基本原则，是要充分发挥注浆孔的潜力，以获得最大的注浆体厚度，不允许出现两排孔间的搭接不紧密的“窗口”，也不要求搭接过多出现浪费。

6.4.7 d) 超前帷幕注浆顺序应从外向内分层施作。每环注浆孔先施工奇数编号注浆孔，然后施工偶数编号注浆孔，同时作为检查孔。注浆宜采取反复注入、稀浆与浓浆交替、压力控制与注入浆量控制相结合的措施，注浆压力应从低到高逐渐加压。注浆作业宜钻一孔注一孔。

6.4.7 e) 帷幕注浆终止压力宜为静水压力 2.0~3.0 倍，三序孔注浆压力应高于一序孔和二序孔；裂隙较发育的岩体帷幕注浆压力宜取小值，其他岩体帷幕注浆压力宜取大值。

7. 监控量测

7.2.3 海底隧道穿越不良地质段时，面临极高施工风险。与传统人工监测相比，选用自动化程度高、寿命长、精度高的设备，可显著提升检测数据的准确性和实时性。通过搭建专门的信息化监控量测系统，实现长期不间断自动监测，实时获取结构瞬态和累计变形，及时进行灾害预警，对不良地质灾害预控与保障人员安全具有重要意义。

7.3.1 施工监控量测项目内容参考 DB53/T 1033《公路隧道监控量测技术规范》5.2 与 5.3 款。针对海底隧道特点，在隧道围岩条件较差、不良地质带的特殊地段适当增加围岩压力、孔隙水压力、水质及涌水量监测项目。

7.4.2 拱顶下沉测点和洞内收敛测点应布置在同一断面上，监控测量断面可按表 2 要求布置，但因围岩及开挖方法、隧道内管线位置等原因，可适当调整。拱顶下沉测点原则上应设置在拱顶轴线附近，当隧道跨度较大时，应结合施工方法在拱部增设测点。

表 2 监控量测项目监控量测断面间距

围岩等级	断面间距 (m)
V~VI	5~10
IV	10~30
III	30~50
II	50~100

注：不良地质和特殊岩土地段、大跨和特殊结构取小值。

7.4.5 涌水量、水质监测断面设置应根据现场实际情况确定，可将表 3 作为参考。

表 3 涌水量、水质监测项目断面选择及测点布置

序号	监控量测项目	断面选择	测点布置
1	涌水量	根据需要设置断面数量，通常 1 个~3 个断面	每断面 1 个~2 个测点
2	水质	根据需要设置断面数量，通常 1 个~3 个断面	每断面 2 个~4 个测点

7.5. 出现下列情况时，应调整洞内监控量测频率：a) 围岩状态变化或遇到不良地质；b) 支护状态明显变化；c) 施工关键工序变化；d) 监测数据异常或超过预警值。

7.6.4 由于氯离子渗透会引发钢筋锈蚀，硫酸盐侵蚀会导致混凝土膨胀剥落。

因此，针对海底隧道特点，应采集足够水样，对水中 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Na^+ 等离子浓度进行监测，并预留复测或仲裁样本。

7.7.5 二次衬砌水压力控制值参考了胶州湾第二海底隧道工程钻爆法隧道监控量测设计资料，建议陆域段不大于 50kPa、海域段不大于 100kPa。

7.7.6 海底隧道通常具有距离长、出入口较中间段高的特点。涌水量超过排水系统的最大抽排能力时，水流将沿隧道坡面向隧道内部流动和汇集，可能会在短时间内形成淹没险情，对隧道内所有作业人员构成直接的生命威胁。因此，当海底隧道水流量监测超过限排标准时，立即停工并撤出洞内正常作业人员是防止出现重大人员伤亡险情的首要且必须步骤，同时加强排水系统抽排能力，并采取合适的涌水封堵措施。

四、试验验证的分析、综述报告，预期的经济、社会效益

（一）试验方法及主要结论

针对海底隧道常见的注浆加固模式，通过理论分析、数值模拟、室内试验、模拟试验、现场试验等方法，研究海底隧道注浆扩散与加固机理，揭示了海水离子侵蚀、渗流以及两者共同作用下注浆加固体的性能劣化机理，建立了海水环境下注浆加固体长寿命周期力学性能-时间模型，形成了海水环境下注浆设计方法，主要试验内容如下：

（1）分析浆液在富水砂层扩散中浆液的路径，采用分形理论研究浆液绕砂颗粒扩散实际路径长度与直线的关系，建立考虑浆液渗透路径的砂层注浆扩散模型；设计砂层渗透注浆扩散模拟试验，获得不同砂层、不同注浆速率下的浆液压力的时空变化规律。

（2）研究浆液配比、砂粒粒径、注浆压力等因素对注浆加固强度和渗透系数的影响机制，获得砂层渗透注浆主控因素及注浆加固体长期性能的变化规律；综合考虑注浆加固效果和施工工期的关系，提出砂层注浆最佳开挖时间；研究海水环境下注浆因素对注浆效果的作用规律，揭示海水环境对注浆加固的强化机理。

（3）基于多孔介质渗流以及稀物质传递理论，研究氯离子在注浆加固体内的扩散规律；研究劣化作用导致的胶结物劣化小颗粒运移规律，揭示海水侵蚀下注浆加固体劣化机理；基于有效应力原理和注浆加固体应力-应变曲线，建立海水侵蚀环境下注浆加固体损伤模型。

(4)设计海水侵蚀环境下注浆加固体侵蚀加速试验,获得不同浆液水灰比、不同海水侵蚀时间条件下注浆加固体强度、渗透系数、孔隙率演化规律,进一步获得海水环境下注浆加固体劣化强度与侵蚀时间的关系。

(5)采用基元体对渗流侵蚀作用下注浆加固体力学性能进行描述,建立渗流作用下注浆加固体损伤力学模型,设计渗流作用下注浆加固体劣化模拟试验,研究不同渗透水压力作用下注浆加固体渗透性的演化规律,获得注浆加固体损伤变量与渗透水压的关系。

(6)考虑海水侵蚀与渗流双重作用对注浆加固体作用机制,建立海水侵蚀与渗流作用下注浆加固体劣化模型;研发大型模拟试验装置,获得注浆加固圈渗流场和应力场变化规律,并同理论值对比,分析其差异性。

(7)现场验证:依托胶州湾第二海底隧道(南线)帷幕注浆工程,对深长钻孔一体化注浆装置进行了现场验证。通过膨胀胶囊、出浆孔开闭控制器、封堵轻质球等关键组件实现了超深钻孔单管分段后退式注浆。与传统分段式前进注浆工艺相比,单孔平均总用时 10 时 29 分钟,注浆施工效率提升 33.6%。

(二) 预期经济效益

本指南涉及海底隧道超前地质预报、不良地质灾害预防控制与监控量测等关键技术领域,其推广应用将推动海底隧道穿越不良地质段预控技术升级、促进相关行业的交叉融合,形成新的高科技产业和市场经济增长点。在胶州湾第二海底隧道中,海底隧道不良地质段超前地质预报技术与控制技术的有机结合,带动和促进了海底隧道不良地质灾害预控技术相关产业的发展。同时,建设、施工等单位参照本指南,可显著提升勘察、设计、施工与管理效率,降低灾害风险与工程成本,保障工程安全有序推进,实现良好的经济效益。

(三) 预期社会效益

本指南系统规范了海底隧道超前地质预报、控制技术及监控量测等关键环节,明确不良地质灾害预控的技术路径与管理细节。指南实施后将有力推动海底隧道设计、施工与管理的系统化、规范化,强化工程质量与安全管控,有效防范建设期涌水涌泥、坍塌等生产灾害及运营期次生灾害,保障工程建设人员生命财产安全与公共出行安全,提升海底隧道全生命周期安全保障水平,显著提升工程建设的社会效益与生态效益。

五、与现行相关法律、法规、规章和其他标准的关系

本指南在编制过程中参考了大量相关国家、行业标准,如《通用硅酸盐水泥》(GB 175)、《公路水运工程施工安全风险评估指南》(JT/T 1375.3)、《公路工程物探规程》(JTG/T 3222)、《公路隧道施工技术规范》(JTG/T 3660)、《公路水下隧道设计规范》(JTG/T 3371)、《公路隧道设计细则》(JTG/T D70)、《注浆技术规程》(YS/T 5211)、《水电水利地下工程地质超前预报技术规程》(DL/T 5783)等相关标准,并结合海底隧道穿越不良地质段预控的工程实际,同时本标准与其他相关国家标准、行业标准相协调、相衔接、无冲突。本标准在编制过程中以尽量直接引用的方式或修改引用其主要技术参数计算方法,与相关规定和文件相协调、相衔接。

六、重大分歧意见的处理过程、处理意见及其依据

无

七、公平竞争审查结论

该标准无排除、限制竞争内容,符合公平竞争原则。

八、实施地方标准的措施建议

本指南为推荐性地方标准,适用于山东省范围内海底隧道不良地质段建设工程的相关活动。标准生效后,相关方在海底隧道不良地质段的超前地质预报、控制技术、监控量测过程中应遵循本指南的规定。

组织措施方面:本技术指南将依托青岛国信发展(集团)有限责任公司胶州湾第二海底隧道项目进行试点应用,主要包括:

- (1) 海洋环境下海底地质调查方案设计;
- (2) 海底隧道超前钻探技术参数选择与质量控制;
- (3) 海底隧道不良地质段地球物理探测方法选择;
- (4) 海底隧道建设中监控量测具体项目与相关要求;
- (5) 海底隧道不良地质段控制技术实施。

指南实施成效的监督与评估主要从以下几方面开展:

- (1) 海底隧道不良地质段建设中超前预报效果的评价;
- (2) 海底隧道不良地质段预控效果及施工安全的评价。

监督工作措施:本技术指南由于特殊性,颁布、贯彻实施前应及时在公众媒

体公开宣传，引起有关人员的高度重视。使相关设计、建设、管理单位能够积极主动的获取资料、参加培训、学习研究标准并积极贯彻实施指南。

（1）在标准归口单位的指导下，积极组织指南宣贯培训班，由指南制定人员主讲，设立专门的答疑或咨询部门或网站，为贯标企业排忧解难；

（2）组织有关人员积极参加行业协会组织的各项活动，及时了解国内外相关标准制定、修订情况，并通过会议/学术报告、宣传册等多元化形式宣传本技术规程；

（3）借助有关企业的板报、宣传栏、横幅、局域网、短信、短视频等进行大力宣传，唤起技术人员和生产人员的重视；

（4）负责贯标工作的企业人员应做好贯标实施工作，跟踪服务对指南贯彻过程中出现的技术问题，进行协调处理并做好记录，进行长期监督检查工作。

九、涉及专利的有关说明

暂无。

十、其他需要说明的内容

暂无。

提出部门：山东省交通运输厅

（盖 章）

2026 年 1 月