

中国交通运输协会团体标准

海底隧道穿越断层破碎带注浆施工 指南

Guidelines for grouting construction of subsea tunnel crossing shattered fault
zone

（征求意见稿）

编制说明

2024-06

一、任务来源、起草单位、协作单位、主要起草人

根据中国交通运输协会发布的“2023 年度第三批团体标准项目拟立项的公告”的要求，由山东大学联合多家单位作为起草单位，负责本规程的编制工作。

主要起草人：张庆松，刘人太，冯啸，曲立清，李相辉，陈增荣，倪健，蒋华，王洪波，孙文昊，张咪，张军杰，徐意臻，伍雨，李翔，谭明伦，王希浩，李良浩。

二、制订标准的必要性和意义

受构造运动影响，海底隧道建设过程中经常遭遇断层、褶皱等破碎带，极易诱发突水突泥、塌方等灾害。同陆域隧道建设相比，海底隧道涌水塌方灾害具有以下特征：（1）隐蔽性强，海域勘察困难，建设风险高；（2）无限补给，上覆海水无限补给，危害巨大；（3）风险性高，海底隧道多采用 V 型设计，一旦发生涌水塌方灾害，人员伤亡风险高。例如，日本青函铁路隧道在修建过程中曾先后发生了 4 次大规模的涌水，导致 34 人死亡；青岛胶州湾隧道共穿越 18 条断层，多条断层破碎带，地质条件极为复杂；厦门翔安海底隧道遭遇多处风化槽薄弱带，带来巨大的安全风险，经济工期投入大幅增加。

针对海底隧道穿越断层破碎带、风化槽等不良地质体的处治措施通常采用注浆方法，注浆可同时提升不良地质体的强度与止水性能，从而满足海底隧道工程建设的安全需求。在海洋环境下，如何合理的选择治理材料、处治工艺、技术参数等关系到海底断层破碎带处治的成败。然而，关于断层破碎带处治技术的相关规程多集中于能源矿山、陆域隧道等，其涉及的材料选型、工艺选择、技术参数、工程设计要求等均与海底隧道工程存在较大的差异，导致在海底隧道施工中仅供参考却无法统一应用。

目前，北京市提出了《盾构法隧道修复加固工程》（DB11/T 1843—2021），内容主要涉及运营期隧道的基底注浆、渗漏治理、管片修补、纤维织物加固、钢内衬加固；福建省提出了《公路海底隧道土建结构养护技术规范》（DB35/T 1941—2020），内容主要涉及海底隧道的移交接养、检查、技术状况评定、技术管理等。因此，行业内尚缺少一部针对建设期海底隧道穿越断层破碎带处治技术的指南，而且随着我国交通事业的飞速发展，对于海底隧道穿越断层破碎带处治技术的规范化和标准化需求日益迫切。

本编制组历经多年的技术研发，依托青岛地铁 1 号线过海隧道、青岛地铁 8 号线过海隧道等进行技术攻关，对多项海底断层破碎带注浆治理过程进行了总结，联合山东建筑大学，青岛国信发展（集团）有限责任公司，山东科技大学，中铁第四勘察设计院集

团有限公司，青岛国信胶州湾第二海底隧道有限公司等单位，计划编制《海底隧道穿越断层破碎带注浆施工指南》。

该技术指南可实现行业内海底隧道穿越断层破碎带注浆施工的标准化，引导海底断层破碎带注浆施工的材料选择、工法设计、技术参数、项目管理，同时可为在建的胶州湾第二海底隧道及规划论证中的渤海湾过海通道提供技术支撑。

三、主要工作过程

项目起草阶段，标准工作组搜集整理了国家、省相关的政策文件，收集分析了《通用硅酸盐水泥》（GB/T 175）、《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》（GB/T 1596）、《钻井液材料规范》（GB/T 5005）、《快速施工用海工硫铝酸盐水泥》（GB/T 39712）、《混凝土外加剂应用技术规范》（GB 50119）、《混凝土结构加固设计规范》（GB 50367）、《建筑结构加固工程施工质量验收规范》（GB 50550）、《岩土工程勘察安全规范》（GB 50585）、《混凝土裂缝用环氧树脂灌浆材料》（JC/T 1041）、《聚氨酯灌浆材料》（JC/T 2041）、《水工建筑物水泥灌浆施工技术规范》（SL/T 62）、《注浆技术规程》（YS/T 5211）、《公路海底隧道土建结构养护技术规范》（DB35 T1941）、《地铁暗挖隧道注浆施工技术规程》（DBJ 01-96）、《盾构法隧道修复加固工程》（DB11-T1843）等标准文件，初步确定了标准框架。

2019年10月-2022年11月，标准工作组对青岛地铁集团有限公司、青岛国信发展（集团）有限责任公司、青岛国信胶州湾第二海底隧道有限公司开展实地调研，调研内容主要涉及海底隧道工程地质特征、水文地质特征、地质灾害类型及相应处治技术等，为进一步开展标准编制工作奠定了基础。

通过调研海底隧道穿越断层破碎带处治现状，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《海底隧道穿越断层破碎带注浆施工指南》草案，主要包括范围、规范性引用文件、术语和定义、总则、注浆浆液、施工、检查、设备与信息化管理、安全与环境保护等章节。

四、制订标准的原则和依据，与现行法律、法规、标准的关系

（一）标准编制原则

海底隧道穿越断层破碎带注浆施工指南制定工作遵循的基本原则有：严格遵守国家和协会有关法律、法规、规章以及技术经济政策；安全适用、经济合理，体现本地气候、

地理、环境等特点；不低于国家标准和地方标准；采用专利技术的，应当取得专利权人许可；具有成熟的工程建设或者产品生产实践经验；拟纳入标准中的科技成果已通过验收或者鉴定，且具备推广应用的条件；与现行有效的相关标准协调配套。同时又遵循标准编写的一致性原则、规范性原则和实用性原则。

1 一致性原则

指南的总体技术路线及相关条款内容遵循了《通用硅酸盐水泥》（GB/T 175）、《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》（GB/T 1596）、《钻井液材料规范》（GB/T 5005）、《快速施工用海工硫铝酸盐水泥》（GB/T 39712）、《混凝土外加剂应用技术规范》（GB 50119）、《岩土工程勘察安全规范》（GB 50585）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

本文件按照《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、总则、注浆浆液、施工、检查、设备与信息化管理、安全与环境保护等内容。

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号线过海隧道以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，重点关注海底隧道穿越断层破碎带处治的规范性，以保证海底隧道建设的安全性及经济性。

（二）标准编制依据

指南在编制过程中，结合海底隧道穿越断层破碎带注浆施工的实际，重点引用和参考了隧道注浆设计及施工、隧道设计等相关法律法规、政策文件、技术指导、标准、文献等。

本规程编制过程中，查阅了下列规范、标准和技术规程：

- 1 《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》（GB/T 1596）
- 2 《钻井液材料规范》（GB/T 5005）
- 3 《快速施工用海工硫铝酸盐水泥》（GB/T 39712）
- 4 《地下水工程防水技术规范》（GB 50108）
- 5 《混凝土外加剂应用技术规范》（GB 50119）

- 6 《岩土工程勘察安全规范》(GB 50585)
- 7 《公路隧道设计细则》(JTG D70)
- 8 《混凝土裂缝用环氧树脂灌浆材料》(JC/T 1041)
- 9 《聚氨酯灌浆材料》(JC/T 2041)
- 10 《公路隧道设计规范第一册 土建工程》(JTG 3370.1)
- 11 《水工建筑物水泥灌浆施工技术规范》(SL/T 62)
- 12 《注浆技术规程》(YS/T 5211)

(三) 与现行法律、法规、标准的关系

本标准在编制过程中参考了大量相关国家、行业以地方标准,如《通用硅酸盐水泥》(GB/T 175)、《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》(GB/T 1596)、《钻井液材料规范》(GB/T 5005)、《快速施工用海工硫铝酸盐水泥》(GB/T 39712)、《混凝土外加剂应用技术规范》(GB 50119)、《混凝土结构加固设计规范》(GB 50367)、《建筑结构加固工程施工质量验收规范》(GB 50550)、《岩土工程勘察安全规范》(GB 50585)、《混凝土裂缝用环氧树脂灌浆材料》(JC/T 1041)、《聚氨酯灌浆材料》(JC/T 2041)、《水工建筑物水泥灌浆施工技术规范》(SL/T 62)、《地铁暗挖隧道注浆施工技术规程》(DBJ 01-96)、《盾构法隧道修复加固工程》(DB11-T1843)等标准文件,并结合海底隧道穿越断层破碎带注浆的工程实际,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。

无与本标准相关联的强制性国家标准。

本标准符合现行法律法规、政策文件的要求。

五、主要内容的解释和说明,主要技术指标、参数、实验验证的论述

(一) 主要条款的解释和说明

1 范围

本文件提出了海底隧道穿越断层破碎带注浆施工的基本规定、海洋环境下材料选型、海底断层破碎带加固止水、信息化注浆管理、安全与环境保护的建议。

本文件适用于海底隧道穿越断层破碎带注浆施工。

2. 规范性引用文件

本规范所引用的国家、行业有关规范、规程、标准均为现行且有效的,条文中给出

编号，以便于使用时查找。

3 术语和定义

本章对海底隧道穿越断层破碎带注浆施工相关的概念进行了解释，便于指南应用者理解和应用。

3.1 海底断层破碎带 subsea shattered fault zone

海底断层破碎带是在海底由断层或裂隙密集带所造成的岩石强烈破碎、涌水量大、围岩自稳能力差的地段。

3.2 注浆 grouting

将一定材料配制成浆液，通过压送设备把浆液注入地层内，浆液以填充、渗透、劈裂及压密等方式驱赶地层中的水、空气并占据其空间位置，通过浆液的胶凝、固化达到加固地层及防渗止水的目的。

3.3 超前注浆 advanced reinforcement grouting

为提高隧道开挖施工安全性，开挖前对掌子面前方岩土体进行的注浆作业。

3.4 径向注浆 radial grouting

为控制隧道围岩变形或止水，垂直隧道洞壁布设注浆孔，对隧道周围岩土体进行的注浆作业。

3.5 帷幕注浆 curtain grouting

在洞身外围通过注浆形成的相对隔水带，减少洞身涌水量并加固围岩的技术措施。

4 总则

本章结合海底隧道穿越断层破碎带注浆施工的工程实际，对海底隧道穿越断层破碎带的资料收集、处治手段、编制专项方案、专项方案实施程序进行了规定。

5 海洋环境下材料选型

本章在参考相关国家、行业标准的基础上，结合海底隧道穿越断层破碎带注浆施工的工程实际，对海洋环境下材料选择、浆液配制进行了规定。

5.1 一般规定

5.1.1 GB 175《通用硅酸盐水泥》规定了通用硅酸盐水泥的分类、组分与材料、强度等级、技术要求、试验方法、检验规则和包装、标志、运输与贮存，注浆用水泥应符合其规定要求。

5.2.1 参考YS/T 5211-2018《注浆技术规程》3.2.2款。浆液按浆材特性分为化学浆液和粒状浆液，硅酸钠和碱液是常用的两种无机化学浆液，常用的粒状浆液有水泥浆和

水泥基浆。从注浆施工可注性、注浆效果、经济性以及环保等各方面综合考虑，注浆材料应优选水泥基浆液、水泥加化学外加剂混合浆液。

化学浆液黏度低、可注性好、凝结时间可控，但经济性差，大多数有毒性，污染环境，通常用于处理颗粒浆液无法注入的细微裂隙和粉砂等地层，常用注浆类型见表1。

表1 常用的浆液类型

浆 液		浆液类型
粒状浆液（悬浮）	不稳定粒状浆液	水泥浆
		水泥砂浆
	稳定粒状浆液	粘土浆
		水泥粘土浆
化学浆液	无机浆液	硅酸盐、碱液
	有机浆液	环氧树脂类
		甲基丙烯酸酯类
		丙烯酰胺类
		木质素类
		其他

5.2.2 参考SL/T 62-2020 《水工建筑物水泥灌浆施工技术规范》3.3.7款。

1. 黏土的性能指标因地层地质情况不同而异，当填充地层大空隙时黏土的黏粒含量可以偏低，甚至可掺加粉土。

2. 当治理地层细空隙时，掺加黏土的黏粒含量应高一些，或采用膨润土。制备水泥黏土浆时，黏土宜先制成浓浆再加入到水泥浆中拌制。

3. 根据GB/T 1596-2017 《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》，加入水泥浆液可使用F类粉煤灰（由无烟煤或烟煤煅烧收集的粉煤灰）和C类粉煤灰（由褐煤或次烟煤煅烧收集的粉煤灰，氧化钙含量一般大于或等于10%）。帷幕注浆、固结注浆宜使用I、II粉煤灰，回填注浆可使用III级灰。各级粉煤灰的品质指标见表2。

表2 粉煤灰等级和主要品质指标

指标	等级		
	I 级	II 级	III 级
细度（45μm 方孔筛筛余）/%	≤12.0	≤30.0	≤45.0
需水量比/%	≤95	≤105	≤115
烧失量/%	≤5.0	≤8.0	≤10.0
含水量/%	≤1.0		
三氧化硫质量分数/%	≤3.0		
密度/（g/cm ³ ）	≤2.6		

4. 砂浆用于注浆时主要是针对大空隙的回填或堵漏。为便于注浆泵输送一般使用细砂。

5. “其他掺合料”，如石粉、赤泥、硅粉等。在有些堵漏注浆中，甚至可掺入锯末、棉籽壳、黄豆、海带等材料。

5.2.3 本条中所说“稳定剂”的作用是增强浆液沉降稳定性，其与石油钻井泥浆中使用的降失水剂、增黏剂作用相似。

5.2.4 水泥-水玻璃注浆材料宜采用硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥配制，推荐水泥浆液水灰比为(0.4:1~1:1)。采用其他水泥时应符合相应标准的要求。水泥-水玻璃注浆材料所采用的工业硅酸钠(水玻璃)模数在 2.4~3.4之间，浓度宜为 30~50 波美度。根据工程需要，水泥浆液与水玻璃体积比可选择1:0.1~1:1.5。

5.2.5 符合现行行业标准JC/T 2041 《聚氨酯灌浆材料》的规定。

表 3 油溶性聚氨酯液材料指标

序号	项目	指标
1	密度 (g/cm ³)	≥1.05
2	粘度 (MPa·s)	≤1.0×10 ³
3	凝固时间 (s)	≤800
4	不挥发物含量 (%)	≥78
5	发泡率 (%)	≥1000

5.2.6 符合现行行业标准JC/T 1041 《混凝土裂缝用环氧树脂灌浆材料》的规定。

表 4 亲水性环氧浆液材料指标

序号	项目		指标
1	固化物含量 (%)		≥90
2	浆液密度 (g/cm ³)		≥1.00
3	初始粘度 (MPa·s)		≤200
4	可操作时间 (min)		≥30
5	抗压强度 (MPa)		≥70
6	拉伸抗剪强度 (MPa)		≥8.0
7	抗拉强度 (MPa)		≥15
8	粘结强度	干粘度 (MPa)	≥4.0

6 施工

本章在参考相关国家、行业标准的基础上，结合海底隧道穿越断层破碎带注浆施工的工程实际，对穿越海底断层施工进行了规定。

6.2 超前锚杆

6.2.1 超前锚杆布置与超前小导管相同、作用原理相同，但作用能力较超前小导管

弱。当松散破碎围岩钻孔成孔性差时,可采用自进式超前锚杆。参考JTG 3370.1-2018 《公路隧道设计规范第一册 土建工程》13.2.3款。

6.2.8 推荐使用普通硅酸盐水泥或复合硅酸盐水泥,对于硫酸盐腐蚀地层和地下水环境可采用抗硫酸盐水泥;当有早强要求时,宜采用早强硅酸盐水泥;由于铝酸盐水泥水化热高、硬化快,存在浆体易开裂、抗腐蚀性差等问题,故只可用于短期试验锚杆。

6.3 超前小导管

6.3.1 超前小导管具有管棚的作用,比超前锚杆的支护能力强;相比管棚简单易行,灵活经济,但支护能力较管棚弱。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。参考JTG 3370.1-2018 《公路隧道设计规范第一册 土建工程》13.2.2款。

6.3.4 超前小导管是沿隧道拱部开挖轮廓线布置,向纵向前方外倾 $5^{\circ} \sim 12^{\circ}$ 角度打设排列注浆小导管(图1)。小导管的外露端需支承在紧邻开挖面的钢架上,与钢架组成纵横向支撑体系,通过小导管向前方围岩注浆,使浆液渗透到围岩,能加固一定范围内的围岩,又能支托围岩。参考 JTG 3370.1-2018 《公路隧道设计规范第一册 土建工程》13.2.2 款。

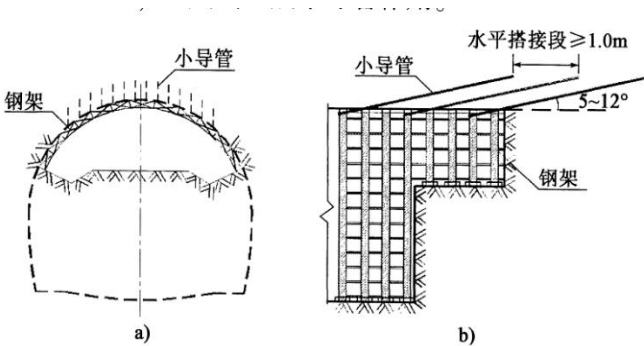


图1 小导管超前支护

6.3.7 小导管杆体钻有注浆孔,呈梅花形布置,前端成锥形,尾部留有长度不小于500 mm 长的止浆段(图2)。参考 JTG 3370.1-2018 《公路隧道设计规范第一册 土建工程》13.2.2 款。

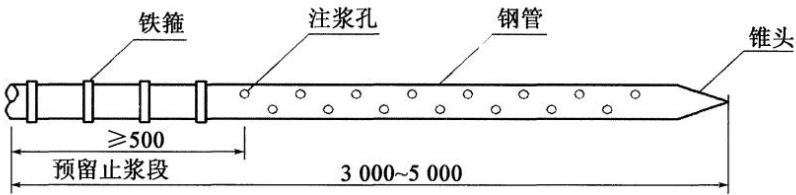


图2 小导管构造(尺寸单位: mm)

6.4 超前长管棚

6.4.1 管棚（也称超前大管棚）是在隧道开挖前，将一系列钢管（导管）顺隧道轴线方向在隧道开挖轮廓线外排列布置形成的钢管棚。随着隧道开挖，管棚钢管与及时施作的钢架连接形成纵横向的支护体系（图 3）。由于管棚是在隧道开挖前施作，对掌子面前方拱顶围岩形成纵向支护，隧道开挖过程中在钢架支撑的共同作用下，对阻止围岩下沉、防止掌子面拱顶塌方及维护掌子面稳定等有显著效果，超前大管棚具有很强的超前支撑能力和控制沉降能力，在塌方地段都可以采用。参考 JTG 3370.1-2018 《公路隧道设计规范第一册 土建工程》13.2.1 款。

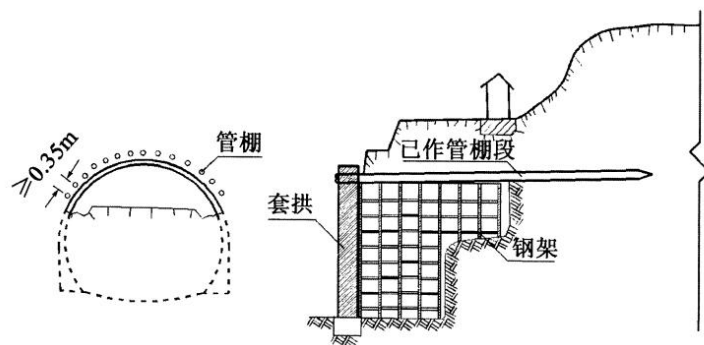


图 3 管棚超前支护

6.4.2 管棚钢管节段长度，根据管棚工艺确定。钢管每一接头与相邻钢管接头错开，错开距离不小于 500 mm，并保证同一断面钢管接头不大于 50%。

管棚一次支护的钢管长度一般为 10~45 m，支护长度约 8~40 m，根据需要确定超前支护长度。当需采用超前支护的长度大于 40 m 时，一般采用其他超前支护措施继续延伸；也可分两次施作。两次管棚之间、管棚与其他超前支护之间要有不小于 3.0 m 的水平搭接长度，以保证钢管远端的有效支撑。管棚长度小于 10 m，采用管棚作为超前支护不经济。需作超前支护的地段长度在 10~40 m 内时，为保证开挖后管棚远端仍有足够的超前支护长度，钢管需伸入稳定地层不小于 3.0 m。参考 JTG 3370.1-2018 《公路隧道设计规范第一册 土建工程》13.2.1 款。

6.4.3 管棚钢管布置的形状与隧道开挖面形状相似，钢管中心距开挖轮廓线的距离为 100~200 mm，图 4 所示。拱部管棚设 0.5° ~ 2° 的外倾角，避免纵向管棚钢管侵入隧道开挖轮廓线内。参考 JTG 3370.1-2018 《公路隧道设计规范第一册 土建工程》13.2.1 款。

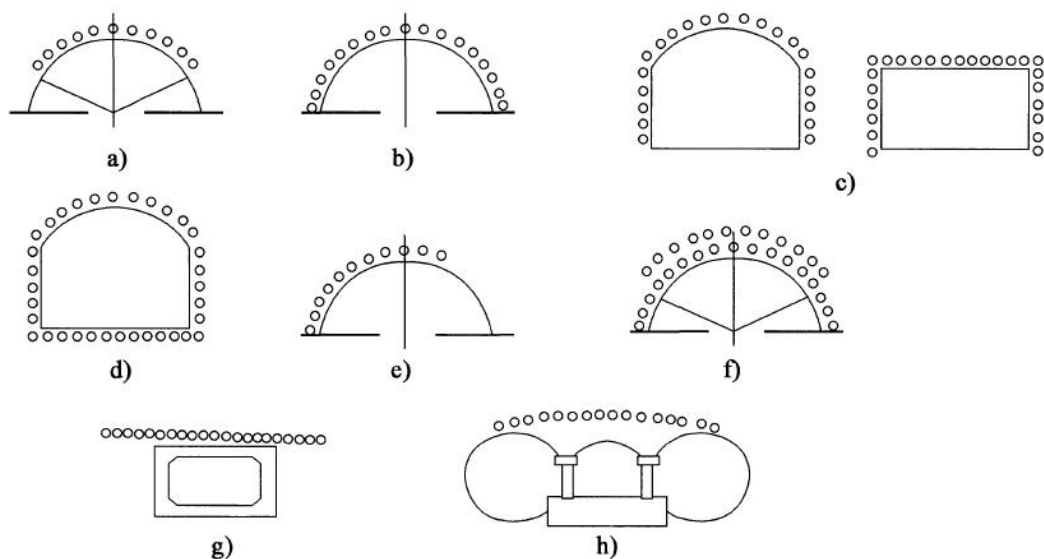


图 4 管棚形状

6.4.4 管棚钢管环向间距视支护段地质条件而定，保证两管之间不掉渣，一般为 35 ~ 50 cm，在围岩为含水的砂土质地层、松散碎石层、回填地层、破碎围岩粒径较小的地层取小值。参考 JTG 3370.1-2018 《公路隧道设计规范第一册 土建工程》13.2.1 款。

6.4.5 管棚钢管管壁钻注浆孔小孔（图 5），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。钢管尾端有不钻孔的止浆段，止浆段为伸入岩体内 1.0 ~ 2.0 m 范围，止浆段和外露段不钻孔。

管棚钢管注浆主要目的是将管内空间注满砂浆，以提高钢管的刚度、提高钢管在隧道纵向方向的支护能力。参考 JTG 3370.1-2018 《公路隧道设计规范第一册 土建工程》13.2.1 款。

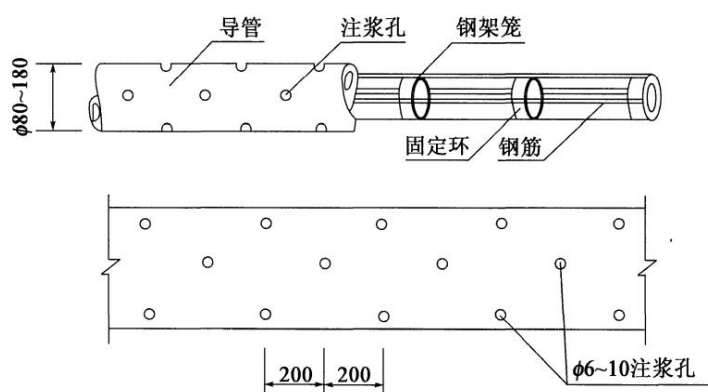


图 5 管棚钢管构造（尺寸单位：mm）

6.4.7 注浆一般采用有限注浆法进行设计，注浆浆液水灰比 1:0.5 ~ 1:1，注浆初始压力 0.5 ~ 1.0 MPa。参考 JTG 3370.1-2018 《公路隧道设计规范第一册 土建工程》13.2.1 款。

6.4.8 应根据注浆目的、地层可注性、注浆效果、注浆工艺等因素选择合理的注浆材料和浆液配比，并应根据开挖过程中的加固效果检查，不断优化调整浆液的配合比。

6.4.9 为保证钢管的连续性和强度，管内需设钢筋笼或钢筋束并注满砂浆。钢管节段之间若连接不良则容易发生断管，使管棚失效，插入钢筋笼或钢筋束能保证钢管整体连续；管棚内注满具有一定强度的砂浆是为保证钢管强度和刚度，受力后钢管不产生折、瘪，保证整个管棚支撑体系的支撑能力。参考 JTG 3370.1-2018 《公路隧道设计规范第一册 土建工程》13.2.1 款。

6.5 超前帷幕

6.5.5 超前帷幕注浆加固范围应根据海底隧道埋深、地下水压力及浆液固结体强度通过计算确定，加固范围宜为开挖轮廓线外不少于4 m。

6.5.7 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，然后施工偶数编号，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。参考JTGT D70-2010 《公路隧道设计细则》的16.6.9款。

6.5.14 参考YST 5211-2018 《注浆技术规程》5.4.4款，帷幕注浆质量检验孔数量不应少于注浆孔总数的10%，帷幕轴线上检验孔间距不应大于30 m。

参考DZ/T 0285-2015《矿山帷幕注浆规范》的5.4.6款，帷幕注浆工程应包含注浆孔、检查孔、加密孔和监测孔。检查孔数量宜为注浆孔数量的10%，加密孔数量宜为注浆孔数量的10%~15%，监测孔数量宜为注浆孔数量的8%~12%。

6.5.15 止浆墙的厚度采用平板理论公式参考崔云龙的《简明建井工程手册》。北京：煤炭工业出版社，2003. 1380-1387。并参考借鉴JTGT D70-2010 《公路隧道设计细则》的16.6.3款。

6.5.19 帷幕注浆结束标准参考YST 5211-2018 《注浆技术规程》5.2.6款，采用自上而下分段注浆法时，注浆段在最大设计压力下，流量不大于1 L/min后，继续注浆60 min，可结束注浆；采用自下而上分段注浆法时，在该注浆段最大设计压力下，流量不大于1 L/min后，继续注浆30 min，可结束注浆。

参考DZ/T 0285-2015《矿山帷幕注浆规范》的5.6.8款，各注浆段注浆结束指标应根据地质条件、注浆压力、注浆量、段高等确定。一般情况下，当注浆段在达到设计压力，每米注入率不大于1 L/min时，继续灌注30 min即可结束注浆。

6.6 径向注浆

6.6.2 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”，也不要要求搭接过多出现浪费。参考 JTGT D70-2010 《公路隧道设计细则》的 16.7.7 款。

6.6.7 参考 GB 50108-2008 《地下水工程防水技术规范》，分析资料时要结合注浆设计、注浆记录、注浆结束标准，分析各注浆孔的注浆效果等。

钻孔取芯法是按照设计要求在注浆薄弱地方，钻检查孔，检查浆液扩散、固结情况，并进行压水（抽）水试验，检查地层的吸水率（透水率），计算渗透系数及开挖时的出水量。

圆梁山隧道：0.2 L/(min·m)；齐岳山隧道 F11 高压富水断层带：1.5 L/(min·m)；日本青函海底隧道 F15 高压富水断层：0.4 L/(min·m)；部分相关工程：2 L/(min·m)；类似工程大部分采用平均涌水量 <0.2 L/(min·m)，且一处涌水量 <10 L/min；江西永莲隧道采用检查孔平均涌水量 <0.2 L/(min·m)，且一处涌水量 <10 L/min；均昌隧道采用单孔涌水量 <0.20 L/(min·m) (0.50 L/(min·m))，且单点涌水量 <3 L/min，检查孔成孔率达到 75%以上。

6.6.9 在一定时间内，无海水环境下岩土层注浆加固体强度与时间正相关，渗透系数与时间负相关。尤其浆液凝胶固化初期，注浆加固体强度与渗透系数变化较为迅速，其中，加固体 3d 强度较低，7d 强度基本为 3d 强度的两倍，且加固体 7d 渗透系数约为 3d 渗透系数的 60%。因此，水泥浆液进入被注岩土层，水化反应最为剧烈的时间为 3d~7d。综合考虑注浆加固体强度和抗渗性的注浆效果与施工工期的关系，无海水环境下隧道工程最佳开挖时间宜为注浆结束后 7d。

6.6.10 在一定时间内，海水环境对注浆加固体强度影响总体呈现先增强后减弱的趋势，养护时间为 3d~90d，海水环境对注浆加固体强度表现为正相关；90d~180d 内是过渡变化阶段，随着注浆因素的不同，具体时间稍有区别。180d 后海水环境对注浆加固体强度表现为负相关；在海水环境的正相关情况下，海水影响程度呈现先增大后减小的趋势，其中在 28d 时强度达到正相关最大值。

7 检查

7.3 注浆加固时应按主控项目和一般项目进行检查，具体分类如

1 主控项目包含以下项目：

- a) 注浆材料;
- b) 浆液配合比。

2 一般项目包含以下项目:

- a) 注浆效果;
- b) 注浆孔的数量、间距、孔深。

7.4 管棚应按主控项目和一般项目进行检查, 具体分类如下:

1 主控项目包含以下项目:

- a) 管棚所用钢材的品种、级别、规格和数量;
- b) 管棚注浆量、注浆压力、配合比。

2 一般项目包含以下项目:

- a) 管棚仰角、搭接长度及与受力拱架的连接;
- b) 管棚施工偏差。

7.5 注浆过程中根据地质情况、注浆目的等控制注浆压力, 其具体数值经过现场试验确定。注浆结束后检查其效果, 不合格者再次补浆, 浆液终凝后再进行开挖。

注浆效果检查常采用如下方法:

1. P-Q-t 曲线分析法。通过分析注浆过程中地层吸浆量和注浆压力的变化, 绘制 P-Q-t 曲线, 对注浆效果进行分析评定。

2. 钻孔出水量分析法。绘制出水量随时间效应图, 计算各阶段注浆堵水率。

3. 注浆量分析法。绘制注浆量随时间效应图, 反算填充率。

8 设备与信息化

本章结合海底隧道穿越断层破碎带注浆施工的工程实际, 对注浆施工所用设备和信息化管理进行了规定。

8.1.4 集中制浆站的机械化、自动化对保证水泥浆的拌制质量、提高生产效率、改善工人劳动条件、减少环境污染有极大作用。有些工程开发出全自动制浆系统, 能实现对制浆量、输浆量、浆液密度等参数自动检测、记录和传输, 能接入上位系统, 接收上位系统的指令。

8.2.2 规定了注浆记录仪的主要功能, 目前市场上的注浆记录仪型号较多、功能不一, 对于一般注浆工程的基本需求而言, 注浆记录仪能测记注浆压力、注入流量两个参数即可。考虑到当前大多数工程采用了压力、注入流量和浆液密度的三参数记录仪, 因此增加了测量记录浆液密度。有些重要工程或注浆试验还要求同时测记抬动变形, 可以

根据需要配置。

8.2.3 注浆工程数字化管理主要是指对注浆施工过程数据的自动检测、采集、传输和处理，条文对其提出一般性要求。

值得指出的是数字化管理的基础是数字、是原始数据，首先应保证原始数据的正确性、真实性，数字化管理才有意义。

8.2.4 国内已有一些工程，如在大坝数字管理系统上接入注浆数字管理系统，后者作为前者的一个子系统，运行良好。

8.2.5 参考SL/T 62-2020 《水工建筑物水泥灌浆施工技术规范》3.6.4款。人工智能用于注浆施工是一个方向，但目前实践经验很少。有些单位开发了自动化和智能化的注浆系统或装置，并试验性地用于注浆工程施工。它们大致具有如下共同点：

1. 系统具备制浆、配浆、注浆过程控制功能模块，各功能模块与主控制单元连在一起，实时进行信息交互，完成注浆过程控制。
2. 现场采集的注浆过程数据可通过云端实时传输及存储。
3. 有的工程仅实现了部分工序的自动化或智能控制，如自动化制浆、注浆压力自动控制、抬动变形自动监测和报警等。

有专家建议智能化系统软件应实现对注浆参数实时信息查询、计算、评价、智能预警及干预，并可通过手机软件客户端或电脑网络两种方式实现。注浆前后岩芯取样成果、物探检测资料、压水试验资料等均应纳入系统数据库中。

值得指出的是，现行注浆技术标准主要是对手工操作或半机械化施工的规范要求。当采用自动化或人工智能技术时，其注浆工艺要求不宜机械照抄照搬本指南条文，而应优化工艺、优化设计，以机之长，补人之短，提高工程质量，提高施工效率。智能注浆系统的程序设计应当广泛融入计算机工程师、注浆工程师、现场施工工程师等各方面的智慧和经验。

9 安全与环境保护

本章在参考相关国家、行业标准的基础上，结合海底隧道穿越断层破碎带注浆施工的工程实际，对安全施工、环境保护措施进行了规定。

9.1.3 根据国家相关安全法律、法规规定，注浆施工的电工、焊工等工种均属于特种作业人员，应持证上岗，施工前应进行培训。参考YS/T 5211-2018 《注浆技术规程》9.1.3款。

9.1.6 搅拌浆液时会产生扬尘及浆液飞溅现象，会对人体皮肤和器官产生损害，因

此注浆作业人员应佩戴安全帽、护目镜、口罩、橡胶手套、围裙、鞋罩和耳塞等防护用品。如皮肤沾上碱液时，用水冲洗会引起皮肤烧伤，立即用5%浓度的硼酸溶液进行中和，不得用水冲洗，其它注浆液可选用中性清洗剂清洗。参考YS/T 5211-2018 《注浆技术规程》9.1.6款。

9.1.7 注浆施工时管道压力较大，曾经发生过高压注浆管接口松脱或高压注浆管爆裂而伤人的事故，因此搅拌站和注浆泵距注浆孔距离较远，应由孔口注浆人员统一指挥开泵、加压和停泵等工序，并保证号令传达畅通。参考YS/T 5211-2018 《注浆技术规程》9.1.7款。

9.2.4 非化学注浆的废浆经收集沉淀，将固相和液相分离处理，达到标准后再排放。对腐蚀性溶液，不得抛洒，应按随搅随用，不得产生较多的废浆，如有废浆应按国家相关规定进行处置。参考YS/T 5211-2018 《注浆技术规程》9.3.4款。

附录A: 本标准对海底隧道穿越断层破碎带注浆施工做出规定。

（二）主要技术指标、参数、实验验证的论述

1 试验内容

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。

2、关键技术

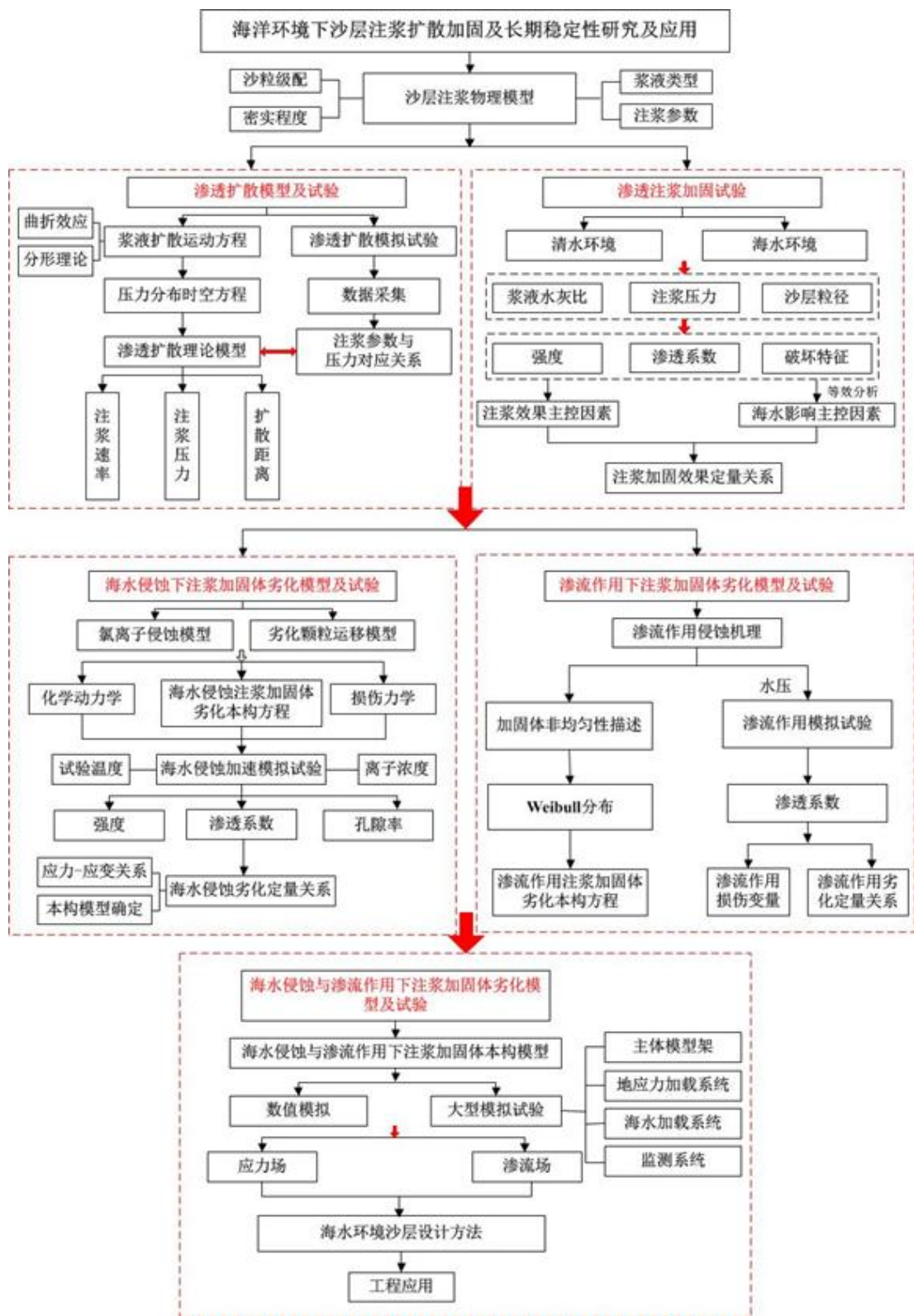
（1）建立了考虑浆液渗透路径的砂层注浆扩散模型，该模型修正了浆液在砂层中扩散的实际路径长度，能更准确地描述浆液在砂层中的扩散过程。

（2）建立了注浆因素与注浆加固体长期力学性能的定量关系，考虑海水对注浆加固体性能的影响，揭示了海水因素对注浆加固体性能作用机制并量化。

（3）基于海水离子侵蚀注浆加固体胶结物劣化小颗粒运移规律，揭示了海水侵蚀下注浆加固体劣化机理；建立了海水侵蚀与渗流作用下注浆加固体劣化模型，研发了海洋环境下注浆加固体劣化大型模拟试验系统，实现了海洋环境下注浆加固体劣化过程的较真实模拟。

3、技术路线

技术路线如下图所示：



技术路线图

以上试验全面验证编写条款的适用性和可行性，验证结果来看，满足标准编写要求。

六、重大意见分歧的处理依据及结果

本标准制订过程中尚未发生过重大意见分歧。

七、采用国际标准和国外先进标准的，说明采标程度，以及与国内外同类标准水平的对比情况

未采用国际标准和国外先进标准，暂无与国际、国外同类标准水平的对比。

八、作为推荐性标准建议及其理由

本指南针对行业内的海洋环境下材料选型、海底断层破碎带超前加固、海底断层破碎带径向加固、海底断层破碎带帷幕止水、信息化注浆管理、安全与环境保护等方面进行了规范，推进海底隧道建设施工的规范化，加强了海底隧道建设的质量控制与安全控制，可有效减少因处治施工不规范造成的安全问题及质量问题。

建设单位、施工单位等参考本指南能够最大化的提高海底不良地质注浆施工的工作效率和管理效率，保证有序高效的建设施工。同时，参考本指南不但规范了企业的内部管理，降低了管理成本，而且有利于企业对外部利益相关者进行管控。此外，安全施工是所有生产经营活动的重中之重，本指南的实施，可以加强针对注浆施工的安全控制，有效保护人员的安全和健康，为海底隧道安全建设起到指导作用。

九、贯彻标准的措施建议

建议本标准在批准发布 3 个月后实施。

本标准发布后，应向海底隧道建设、施工单位进行宣传、贯彻，向所有从事海底隧道安全设计、使用、管理工作的相关单位和个人推荐执行本标准。

1. 在标准归口单位的指导下，积极组织标准宣贯培训班，由标准制定人员主讲。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. 借助有关企业的广播、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。

十、其他应说明的事项

暂无。