

山 东 省 地 方 标 准

DB37/T 4788—2024

城市轨道交通盾构隧道下穿高架桥风险控制
技术规范

Technical specification for risk control of shield tunnel underpass viaduct in urban
rail transit

2024 - 12 - 30 发布

2025 - 01 - 30 实施

目 次

前言 III

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 总体要求 1

5 风险分级 2

 5.1 通则 2

 5.2 工程自身风险分级 2

 5.3 工程环境风险分级 3

6 勘察设计 4

 6.1 通则 4

 6.2 勘察与环境调查 4

 6.3 变形控制指标 4

 6.4 线路设计 5

 6.5 防护措施设计 5

7 施工 6

 7.1 通用要求 6

 7.2 掘进施工控制 7

 7.3 掘进姿态控制 7

 7.4 掘进参数控制 7

 7.5 盾构施工监控 8

 7.6 盾构注浆控制 8

8 监控量测 8

 8.1 通则 9

 8.2 监测要求 9

附录 A（资料性） 盾构隧道下穿高架桥施工风险清单 1

附录 B（规范性） 盾构小半径曲线掘进地表变形计算 2

 B.1 盾构小半径曲线掘进力学模型 2

 B.2 开挖面附加推力引起的地表变形 3

 B.3 盾壳摩擦力引起的地表变形 5

 B.4 盾尾注浆压力引起的地表变形 6

 B.5 地层损失引起的地表变形 6

 B.6 盾构小半径曲线施工总地表变形 7

附录 C（规范性） 盾构掘进参数设计 9

 C.1 盾构总推力 9

 C.2 刀盘扭矩 10

 C.3 同步注浆量 11

C.4 掘进出土量 11

C.5 土仓压力 11

附录 D（资料性） 盾构隧道下穿高架桥监测项目 13

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。

城市轨道交通盾构隧道下穿高架桥风险控制技术规范

1 范围

本文件规定了城市轨道交通盾构隧道下穿高架桥的勘察设计、施工、监控量测中风险控制的技术要求，描述了对应的证实方法。

本文件适用于城市轨道交通盾构隧道下穿铁路、公路、市政等高架桥的风险控制。

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。

- GB 50157 地铁设计规范
- GB 50446—2017 盾构法隧道施工及验收规范
- GB 50652—2011 城市轨道交通地下工程建设风险管理规范
- GB 50911—2013 城市轨道交通工程监测技术规范
- GB/T 51438 盾构隧道工程设计标准
- CJJ/T 202—2013 城市轨道交通结构安全保护技术规范
- TB 10182—2017 公路与市政工程下穿高速铁路技术规程

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

盾构姿态 shield position and stance

盾构主机的空间状态，通常采用横向偏差、竖角、方位角、滚转角和切口里程等参数描述。

[来源：GB 50446—2017，2.0.17]

3.2

地层损失 ground loss

盾构隧道施工中实际开挖土体体积与竣工隧道体积之差。

3.3

监测预警 monitoring pre-warning

通过收集、分析和解释各种数据和信息，对可能发生的突发事件、风险或异常情况进行提前识别和警示的过程。

3.4

隔离桩 isolation pile

一种利用桩结构起到阻隔地基附加应力和地层变形传递作用，并减少对既有结构物影响的工程措施。

[来源：TB 10182—2017，2.0.6]

4 总体要求

- 4.1** 城市轨道交通盾构隧道下穿高架桥工程，应搜集以下基础资料：
- 工程地质和水文地质勘察报告；
 - 施工沿线的环境、建（构）筑物、地下管线和障碍物等调查报告；
 - 既有桥梁的设计资料、荷载情况、竣工资料等；
 - 既有桥梁的现状技术状况评定报告、安全评估报告（I 级、II 级环境风险）；
 - 类似地层的盾构选型及施工经验。
- 4.2** 城市轨道交通盾构隧道下穿高架桥勘察设计、施工、监控量测中应综合考虑地质条件、桥梁结构特点、两者相对位置关系、周边环境要求及施工条件等因素，因地制宜、合理设计、精细控制、动态监控。
- 4.3** 城市轨道交通盾构隧道下穿高架桥工程应根据需要委托具有相应资质和经验的单位提供第三方监测、桥梁结构检测、安全风险评估等技术或管理服务。
- 4.4** 盾构机选型应根据工程场区范围内工程地质与水文地质条件、地面环境、隧道净空尺寸、隧道平纵断面、衬砌型式、施工组织等因素综合确定，并符合 GB/T 51438 相关要求。
- 4.5** 城市轨道交通盾构隧道下穿高架桥工程各阶段均应开展安全风险技术管理工作，并符合 GB 50652—2011 相关要求。
- 建设规划及可行性研究阶段以规避风险为主，对线路走向、埋深及工程方案进行调整或优化。
 - 勘察设计阶段以规避和降低风险为原则，选择安全合理、技术可靠、工艺成熟、对桥梁结构影响小的设计方案。
 - 施工阶段以控制风险为原则，依据设计文件、施工规范标准的要求制定专项施工方案，并严格按照审批的施工方案施工，加强施工组织管理，开展工程监测、现场巡视、安全风险评价、预警、响应及处置等施工安全风险防控工作。

5 风险分级

5.1 通则

- 5.1.1** 风险分级标准应根据工程特点、工程地质及水文地质、周边环境条件及可能造成的影响（危害）等综合确定。
- 5.1.2** 按照风险等级由高到低顺序，工程自身风险分为 I 级、II 级和 III 级，环境风险分为 I 级、II 级、III 级和 IV 级。
- 5.1.3** 可采用事故树法、检查表法（见附录 A）、工程类比法、专家调查法和模糊综合评判法等方法对风险进行辨识和分级。

5.2 工程自身风险分级

5.2.1 工程自身风险分级宜以盾构隧道相互之间的空间位置关系、地质条件适宜性以及工程部位等为基本分级条件，并根据工程地质及水文地质条件、盾构机型式等进行修正。盾构法工程自身风险分级应符合表 1 规定。

表1 盾构法工程自身风险分级表

工程自身风险	基本分级条件	分级修正
--------	--------	------

分级		
I 级	较长范围处于非常接近状态（隧道净距 $L_1 \leq 0.3D$ ）的并行或交叠盾构隧道	a) 对以下情况，可上调一级： 1) 地质条件复杂（岩溶、半软半硬、富水砂层、不均匀风化、采空区、通航河流等）； 2) 线路条件复杂(曲线半径小于 350 m、纵坡大于 25%)； 3) 内径大于 10m 的盾构隧道。 b) 地质条件简单（土层均一、无地下水），可下调一级。
II 级	较长范围处于接近状态（ $0.3D < L_1 \leq 0.7D$ ）的并行或交叠盾构隧道；盾构区间的联络通道；盾构始发、到达区段	
III 级	一般的盾构法区间隧道	
注1： L_1 为盾构隧道净距，单位为米（m）； 注2：D为盾构隧道直径，单位为米（m）； 注3：风险分级修正时，最多调整一个等级。		

5.2.2 盾构法工程自身风险分级修正应结合不良地质、特殊性岩土、承压水等不利于工程实施的条件进行综合确定。

5.3 工程环境风险分级

5.3.1 工程环境风险分级宜根据桥梁重要性、与新建城市轨道交通工程的接近程度、轨道交通建设对桥梁的影响程度大小综合确定。

5.3.2 桥梁重要性依据高架桥的类型、功能、使用性质、特征、规模等综合确定，按照桥梁重要性由高到低顺序，分为极重要、重要、较重要、一般四级。桥梁重要性分级宜符合表 2 的规定。

表2 桥梁重要性分级表

桥梁重要性	基本分级条件	分级修正
极重要	高速铁路桥梁	a) 桥梁为简支梁桥，可下调一级； b) 桥梁基础为端承桩且为盾构隧道侧穿桥梁（不含高速铁路桥梁），可下调一级； c) 铁路桥梁道岔区，应上调一级。
重要	城市轨道交通桥梁、普通铁路桥梁、高速公路桥梁	
较重要	城市快速路桥梁、城市主干路桥梁	
一般	次干路桥梁、匝道桥、人行天桥、其他一般桥梁	

5.3.3 桥梁与新建城市轨道交通工程的接近程度宜用接近关系表示，按照接近程度由近到远顺序，分为非常接近、接近、较接近、不接近四级。桥梁与新建城市轨道交通工程接近关系分级宜符合表 3 的规定。

表3 桥梁与新建城市轨道交通工程接近关系分级表

接近关系	基本分级条件
非常接近	桥梁基础位于隧道正上方0.7D(含)范围内；或隧道外侧0.3D(含)范围内
接近	桥梁基础位于隧道正上方0.7D~1.5D(含)范围内；或隧道外侧0.3D~0.7D(含)范围内
较接近	桥梁基础位于隧道正上方1.5D~3.0D(含)范围内；或隧道外侧0.7D~2.0D(含)范围内
不接近	桥梁基础位于隧道正上方大于3.0D；或隧道外侧大于2.0D

5.3.4 工程环境风险分级宜符合表 4 的规定。

表4 工程环境风险分级表

桥梁重要性	接近关系				分级修正
	非常接近	接近	较接近	不接近	
极重要	I 级	I 级	II 级	III 级	a) 当工程自身风险等级为 I 级，且盾构隧道平行连续侧穿高架桥时，应上调一级； b) 当高架桥建设期间与新建城市轨道交通工程设计存在相关配合或预留了一定下穿条件等情况时，可下调一级。
重要	I 级	II 级	III 级	III 级	
较重要	II 级	III 级	III 级	IV 级	
一般	III 级	III 级	IV 级	IV 级	

5.3.5 当同一单位（子单位）工程范围内存在多个类型相近的环境设施，且可合并采取同一环境保护处理措施时，宜归并为一个环境风险工程群，并按其中较高的风险等级采取措施。

6 勘察设计

6.1 通则

6.1.1 初步设计和施工图设计阶段应在风险辨识与分级的基础上，进行风险工程设计。I 级、II 级环境风险工程应进行专项设计。工程自身风险等级为 I 级时，应编制风险控制专项措施，并应通过理论和试验研究，评估其影响程度和范围。专项设计文件应包含但不限于以下内容：

- 风险分析评价；
- 风险应对措施；
- 施工影响分析；
- 高架桥防护措施；
- 高架桥监测项目控制值及要求；
- 设计及施工中的重点部位和环节等内容。

6.1.2 初步设计和施工图设计阶段编制的 I 级、II 级环境风险工程专项设计，并对专项设计方案进行安全评估。

6.1.3 I 级环境风险工程应对高架桥工程进行检测、评估，形成检测和评估报告。

6.1.4 在设计文件中应注明涉及超过一定规模的危险性较大的分部分项工程的重点部位和环节，提出保障工程周边环境安全和工程施工安全的意见。

6.1.5 施工图设计完成后，应对 I 级、II 级风险工程进行专项交底。

6.2 勘察与环境调查

6.2.1 勘察工作中，宜开展地质风险评价工作。地质风险评价宜包括地质风险因素辨识、地质风险分析评价、地质风险应对措施建议等内容。

6.2.2 遇到下列情况时，应在常规勘察工作及成果的基础上，开展相应的专项勘察工作：

- 存在对工程安全影响较大的特殊地质问题；
- 场地范围内水文地质条件复杂，且预测对工程安全有影响；
- 工程方案变更或施工中出现新的地质问题，且对工程安全有影响。

6.2.3 周边环境调查工作前，应明确提出调查的范围、对象、内容及成果要求等。

6.3 变形控制指标

6.3.1 高架桥的水平位移、沉降、差异沉降和倾斜等变形控制值应在调查分析桥梁规模、结构形式、基础类型、建筑材料、养护情况等基础上，通过结构检测、计算分析和安全性评估确定。

6.3.2 高速铁路高架桥墩顶位移应符合 TB 10182—2017 相关要求，根据下穿工程各阶段工况计算确定，

并评估其对高速铁路运营安全的影响。

6.3.3 I级、II级环境风险工程的风险源监测控制值，宜根据专项安全风险评估成果和专项设计文件确定。

6.4 线路设计

6.4.1 城市轨道交通盾构隧道线路设计应综合考虑下穿地质条件、空间关系、功能需求等因素。

6.4.2 城市轨道交通盾构隧道线路平面宜顺直，与高架桥工程宜为正交；当长距离并行下穿时，应采取相应措施减少盾构施工对高架桥的影响。

6.4.3 线路纵断宜避免穿越断裂带、岩溶、半软半硬、孤石、砂卵石等不利地层，确因条件限制无法避开不利地层时，应结合所处的地质条件进行分析，必要时可采取相应的地层加固等防护措施。

6.5 防护措施设计

6.5.1 盾构隧道下穿高架桥的防护措施设计应根据风险等级，综合考虑工程地质和水文地质特点、周边环境要求、现场情况及技术经济性等因素，经方案比选后采用隔离桩、地层预加固、桥梁基础托换、桥梁加固等防护措施。

6.5.2 对注浆、旋喷等有压力的地层预加固应采取控制注浆压力、设置减压槽等措施，在实施前制定安全可靠的作业方案，并符合CJJ/T 202—2013相关要求。

6.5.3 隔离桩防护措施设计符合以下要求：

- 盾构隧道下穿高架桥，当隧道位于软黏土及饱和粉、细砂等不良地层时，或与隧道之间距离小于1.0D时，应采取隔离桩防护措施；下穿其他类型桥梁，在地层条件良好，且具备隔离桩施工空间时可采用隔离桩；
- 隔离桩宜采用钻孔桩，其与隧道结构间的净距不应小于0.5m，与高架桥桩基的中心距不宜小于4倍高架桥的桩径；
- 根据地质条件，隔离桩顶可设置钢筋混凝土冠梁，隔离桩间可设置止水措施；
- 隔离桩沿隧道线路方向超出高架桥承台两端的设置范围不宜小于1.0D。

6.5.4 地层加固可采用注浆、深层搅拌、高压旋喷等方式，地层加固应进行现场或室内试验，以检验其实施效果。加固方式宜符合表5的规定。

表5 加固方式要求汇总表

加固方式	工作要求
注浆加固	a) 注浆加固法宜适用于砂性土、淤泥质黏土、粉土、黏性土、强风化岩和一般填土层。 b) 注浆加固设计应根据加固目的、地层条件、施工环境等确定相应的注浆方法、注浆材料和注浆范围。 c) 注浆加固浆液材料宜选用以水泥为主剂的单液浆。浆液配合比设计应能适应工程地质和水文地质情况，施工前应进行配比试验。 d) 注浆钻孔宜采用梅花形布置，口径70mm~120mm，间距0.6m~1.8m。垂直精度应小于1%，注浆顺序宜先外围，后中间，环向注浆采用分序施工。 e) 注浆量和注浆压力应根据地层的孔隙特性和浆液的渗透特性，由现场试验确定。 f) 注浆加固后地层无侧限抗压强度应大于0.5MPa，现场应对加固效果进行检查。

表5 加固方式要求汇总表（续）

加固方式	工作要求
深层搅拌加固	a) 深层搅拌法宜用于处理淤泥质黏土、淤泥质粉质黏土、黏土、粉质黏土、黏质粉土等软土地层。 b) 施工前应进行成桩试验，确定深层搅拌的注浆配比和注浆量、搅拌提升速度等施工参数。 c) 搅拌桩的垂直度偏差不应大于1.5%，桩位偏差不应大于50 mm，桩径偏差不应大于4%。 d) 深层搅拌桩7天无侧限抗压强度不应低于0.2 MPa~0.5 MPa，加固后地层无侧限抗压强度应大于0.8 MPa，现场应对加固效果进行检查。
高压旋喷加固	a) 高压旋喷加固宜适用于淤泥质黏土、淤泥质粉质黏土、粘质粉土、砂质粉土、粉砂等地层。 b) 旋喷加固范围应根据加固目的、工程地质和水文地质以及场地条件进行确定。高压喷射加固范围宜达到隧道外轮廓线以外0.5D范围（D为盾构隧道直径）。 c) 根据工程地质和水文地质条件、加固区范围及深度、加固体改良要求、场地条件等因素，可选用双重管或三重管高压旋喷法。 d) 高压旋喷注浆的主要材料可以选用以水泥为主的单液型，也可选用水泥、水玻璃为主的双液型。 e) 高压旋喷桩钻孔垂直度偏差不应大于1.5%。桩位和桩体直径偏差不应大于50mm。桩身中心允许偏差不应大于0.2d（d为设计桩径）。 f) 采用高压旋喷桩进行地基加固时，对桥梁基础产生的附加应力不大于20 kPa。 g) 加固后地层无侧限抗压强度应大于0.5 MPa，现场应对加固效果进行检查。

- 6.5.5 桥梁基础托换的防护措施设计，应符合以下要求：
- 桥梁基础托换设计前，进行现场调查收集相关资料，对原有地基进行加密勘察，对桥梁基础结构进行检测；
 - 桥梁基础托换设计时，依据既有桥梁鉴定结论，制定既有桥梁结构应变超前和托换结构应力滞后的削减措施；并根据上部结构、基础和地基的共同作用，经技术经济分析比较确定，必要时进行专门论证；
 - 临时托换结构设计时，荷载取值根据施工期间实际荷载确定。
- 6.5.6 隧道的工作井、联络通道及泵房等附属工程不宜设置在高架桥桩基外侧 2 倍承台长边尺寸范围内。
- 6.5.7 隧道施工应在隔离桩及其它加固措施达到设计要求后实施。
- 6.5.8 隧道壁后注浆符合以下要求：
- 盾构隧道施工期间应进行壁后注浆，壁后注浆分为同步注浆和二次补强注浆，应根据地层特点、结构受力及变形要求、环境控制要求及现场具体情况等分一次或多次完成；
 - 同步注浆量应按照公式 (C.10) 计算；
 - 二次补强注浆应通过管片预留注浆孔完成，特殊情况也可通过地面或地层注浆等其他方式完成。
- 6.5.9 城市轨道交通盾构隧道下穿高架桥时，宜增设管片注浆孔作为应急措施。

7 施工

7.1 通用要求

- 7.1.1 盾构隧道下穿高架桥施工前，应根据设计提出的风险等级编制专项施工方案，并应编制风险应急处置预案。
- 7.1.2 盾构隧道下穿高架桥施工前，应对盾构机设备进行全面故障排查及检修，并组织条件验收，验收合格后方可组织施工。

7.1.3 对于 I 级环境风险，盾构隧道下穿高架桥施工前，应选择相似地层地段进行试掘进，分析、调整、设定相对合理的盾构掘进参数。

7.2 掘进施工控制

7.2.1 掘进施工时应控制盾构排渣量、土仓压力及盾构姿态。

7.2.2 当盾构隧道在小半径曲线段掘进施工时，应采取措施减小已成型管片的横向与竖向位移对盾构隧道轴线的影 响，并控制地层变形对高架桥桩基结构的影响。

7.2.3 盾构隧道下穿高架桥施工宜一次性连续完成下穿掘进。

7.3 掘进姿态控制

7.3.1 盾构隧道下穿高架桥施工前，应提前进行盾构掘进姿态线性复测及纠偏，避免在盾构隧道下穿施工期间进行盾构开仓和大幅度姿态纠偏。

7.3.2 盾构隧道下穿高架桥施工过程中，应做好管片点位选择，合理控制油缸压力和千斤顶行程差。

7.3.3 应对盾构姿态及管片状态进行测量和人工复核，按照设计轴线进行掘进控制。当盾构轴线偏离设计轴线时，控制盾构姿态符合以下要求：

- 盾构纵坡和平面的单环最大纠偏量应小于 0.5%；
- 加强盾尾间隙控制，避免纠偏引起已安装的管片受到破坏；
- 盾构纠偏应防止盾尾漏浆而增大地面变形；
- 盾构掘进轴线与隧道设计轴线的偏角应小于 0.3%；
- 实施盾构纠偏应逐环、小量纠偏；
- 盾构壳体滚转角应控制在 $\pm 0.5^\circ$ 以内；
- 根据盾构的横向和竖向偏差及转动偏差，宜采取千斤顶分组控制、仿行刀适量超挖或反转刀盘等措施调整盾构姿态。

7.3.4 在盾构隧道下穿高架桥施工过程中，遇到下列情况时，应停止掘进、分析原因并及时采取处理措施：

- 高架桥墩身沉降及差异沉降超过报警值；
- 盾构前方地层沉降或隆起超过报警值；
- 盾构壳体滚转角超过 3° ；
- 盾构轴线偏离隧道设计轴线超过 $\pm 50\text{ mm}$ ；
- 盾构推力或刀盘扭矩发生异常波动，与预计值相差超过 50 %；
- 管片严重开裂或严重错台；
- 盾尾同步注浆系统或壁后注浆系统发生故障无法正常注浆；
- 动力系统、密封系统、控制系统等发生故障。

7.3.5 在盾构隧道下穿高架桥施工过程中同时存在盾构小半径曲线掘进时，制定相应的小半径曲线施工控制措施，符合以下要求：

- 使用先行刀进行超挖时，应合理控制超挖量；
- 盾尾壁后注浆应选择体积变化小、早期强度高、速凝型的注浆材料；
- 施工过程中应考虑小半径曲线施工开挖面不均匀附加推力、盾壳非对称摩擦力、刀盘超挖引起盾尾间隙差异等因素对地表变形沉降的影响。盾构小半径曲线掘进地表变形应按照附录 B 计算。

7.4 掘进参数控制

7.4.1 盾构隧道下穿高架桥施工前，应根据隧道工程地质及水文条件、地表环境、桥梁结构特点、桥

隧空间位置、隧道埋深、线路曲率及坡度、盾构姿态、试掘进段经验参数等制定下穿过程掘进参数，并根据施工监测动态反馈调整。盾构掘进控制要求宜符合表 6 的规定，盾构掘进参数应按附录 C 计算。

表6 盾构掘进控制要求

控制项目		盾构掘进控制要求
开挖控制	开挖面稳定	保持开挖面土压平衡，对土仓压力进行实时监测
	开挖排渣	控制掘进速度、螺旋输送机转速的匹配性
	掘进参数	对总推力、扭矩、掘进速度、刀盘转速、土仓压力、千斤顶压力等进行实时监测控制
线型控制	盾构姿态	俯仰角、偏角、偏转、中折角度、曲行量、超挖量
注浆控制	注浆状况及材料	注浆量、注浆压力、配比、稠度、泌水性、胶凝时间、强度
管片拼装控制	组装、防渗、位置	管片拼装错台、开缝、正圆度、紧固扭矩、渗漏水、缺损、裂缝、曲行量、垂直角度

- 7.4.2 土压平衡盾构在软土地层或含水量较大地层应保持渣土充满土仓；在“上软下硬”地层中，应控制土仓接近满仓掘进；在石灰岩等岩质地层中，应合理控制土仓仓位。
- 7.4.3 盾构掘进速度应与地表控制的隆陷值、出渣量、土仓压力及同步注浆等相协调。
- 7.4.4 盾构隧道下穿高架桥施工过程应提前做好姿态调整及渣土改良，维持连续平稳掘进，避免长期停机。

7.5 盾构施工监控

- 7.5.1 应加强施工监测，随时调整推进参数，控制施工后地表变形量，控制盾构、管片、设计轴线三者之间的偏差，偏差控制应符合 GB 50157 相关要求。
- 7.5.2 推进过程中应掌握好开挖面土压力、推力、推进速度、出土量、千斤顶工作油压等施工参数。盾构隧道轴线施工允许偏差应为±50 mm。
- 7.5.3 盾构掘进引起的地层损失率不应大于 1%，相应管片脱出盾尾 15 D 后不同盾构覆土厚度处的地面沉降槽最大沉降量不应大于 30 mm，盾构前方的最大隆起量不应大于 10 mm。

7.6 盾构注浆控制

- 7.6.1 城市轨道交通盾构隧道下穿高架桥工程，应加强注浆控制，并根据注浆填充效果进行壁后二次补偿注浆。同步注浆的浆液性能、注入量及注浆压力应经现场试验确定，注浆压力与注浆量应与掘进速度相适应，应采用多点、对称、均匀注浆。
- 7.6.2 同步注浆控制应以注浆量和注浆压力双指标结合的方法，填充系数应根据地层条件、施工状况和环境要求确定。
- 7.6.3 二次补强注浆不宜超过盾尾管片脱出后 5 环进行，且应根据现场变形监测数据进行多次补浆。
- 7.6.4 盾构注浆作业的浆液，应符合以下要求：
- 注浆材料根据地质条件、工程要求、周边环境及现场具体情况等综合选用，并满足固结强度、凝结时间、可填充性、流动性、收缩率和环保要求；
 - 注浆压力根据地质条件、注入方式、管片类型、设备性能、浆液特性以及隧道埋深等综合确定；通常注浆压力值为地层阻力强度增加 0.05 MPa~0.2 MPa。

8 监控量测

8.1 通则

- 8.1.1 盾构隧道下穿高架桥施工应建立施工测量和监控量测系统，并加强监测信息化动态管理。
- 8.1.2 城市轨道交通盾构隧道下穿高架桥监测项目见附录 D，并根据相应安全评估报告、专项设计及运营管理要求确定。
- 8.1.3 I 级、II 级环境风险工程应根据规范要求及安全评估报告编制专项监测方案。
- 8.1.4 盾构隧道下穿铁路、轨道交通桥梁宜采用远程自动化监测方法。
- 8.1.5 城市轨道交通盾构隧道下穿高架桥监测应根据工程项目特点、监测项目控制值、当地施工经验等制定监测预警等级和预警标准，一般取监测控制值的 70%、85%和 100%划分为三级，监测预警分级标准宜符合表 7 的规定。

表7 城市轨道交通工程监测预警分级标准

预警级别	预警分级标准
黄色预警	变形监测的绝对值和速率值双控指标均达到控制值的 70%，或双控指标之一达到控制值的 85%。
橙色预警	变形监测的绝对值和速率值双控指标均达到控制值的 85%，或双控指标之一达到控制值。
红色预警	变形监测的绝对值和速率值双控指标均达到控制值。

- 8.1.6 出现突发风险事件时，应在原有监测工作的基础上有针对性地加密监测点、提高监测频率或增加监测项目。

8.2 监测要求

- 8.2.1 桥梁结构竖向位移、水平位移及垂直度测点应布置在墩顶和墩身上，并宜在墩顶和墩身两侧对称布置；群桩承台宜适当增加监测点；工程地质不良地段宜适当增加监测点。
- 8.2.2 桥梁结构应力监测点宜布设在桥梁梁板结构中部或应力变化较大部位。
- 8.2.3 桥梁结构的裂缝宽度监测应根据裂缝的具体情况，选择应力或应力变化较大部位的裂缝或宽度较大的裂缝。裂缝监测点应按组布设在裂缝最宽处和首、末端，根据裂缝的长度设当加密，每组不少于 2 个。
- 8.2.4 当采用人工监测时，盾构隧道下穿高架桥监测频率宜符合表 8 的规定，监测频率应符合 GB 50446—2017 和 GB 50911—2013 相关要求；当采用自动化监测系统时，数据采集频率宜采用 20 min/次～60 min/次。当监测数据趋于稳定后，监测频率宜为 1 次/(15 d～30 d)；当发生预警时，监测频率宜适当加密。

表8 盾构隧道下穿高架桥监测频率

监测部位	监测对象	开挖面至监测点或监测断面的距离	监测频率
开挖面前方	周围岩土体、管线、桥梁	$5 D < L_2 \leq 8 D$	1 次/（3 d~5 d）
		$3 D < L_2 \leq 5 D$	1 次/2 d
		$L_2 \leq 3 D$	1 次/1 d
开挖面后方	管片结构、周围岩土体、管线、桥梁	$L_2 \leq 3 D$	（1 次~2 次）/1 d
		$3 D < L_2 \leq 8 D$	1 次/（1 d~2 d）
		$L_2 > 8 D$	1 次/（3 d~7 d）
注1：D为盾构隧道直径，单位为米（m）；			
注2：L ₂ 为开挖面至监测点或监测断面的水平距离，单位为米（m）。			

- 8.2.5 盾构隧道下穿高架桥施工期间应由专人进行现场巡查，每天不宜少于 2 次，并进行记录，异常情况应增加巡查次数。

8.2.6 按照以下要求整理监测成果资料：

- 监测数据应真实、有效；
- 监测数据应及时进行整理，并结合施工进度对监测数据的变化趋势及发生预警的可能性进行分析；
- 监测数据应定时报送，当发生预警或出现塌方、管涌等突发事件时应实时报送；
- 当监测数据达到预警条件时，应按相应的预警状态发出预警并启动相应的预警响应；当出现异常数据时，应对其原因及风险征兆进行及时分析和报告；
- 监测报告应包括监测日报、预警报告、阶段报告和总结报告。监测日报应在盾构隧道下穿高架桥工程监测周期内逐日报送当日监测情况；阶段报告可根据下穿工程进度及相关要求期限提交；预警报告应在出现监测预警后提交，及时报告发生预警的项目及位置、预警情况、分析原因、提出处置建议；总结报告应在下穿工程监测工作完成后提交，汇总整理监测资料，记录分析监测数据，总结预警及处置情况，得出监测结论。

附 录 A
(资料性)
盾构隧道下穿高架桥施工风险清单

城市轨道交通盾构隧道下穿高架桥施工风险清单见表A. 1。

表A. 1 城市轨道交通盾构隧道下穿高架桥施工风险清单

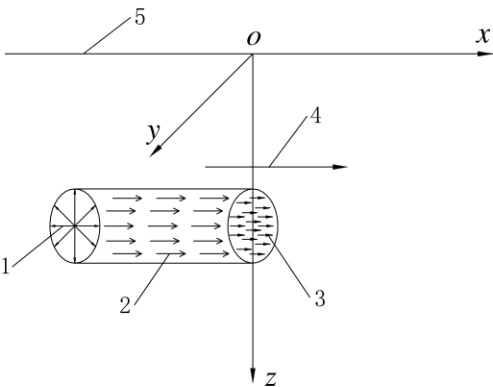
指标	风险类别	编号	风险因素
U ₁	新建盾构隧道风险	1	盾构轴线偏移风险
		2	管片接缝渗透水
		3	开挖面土压失衡风险
		4	盾尾注浆质量不良风险
		5	地层变形过大风险
U ₂	既有高架桥风险	6	墩台倾斜风险
		7	桥桩单桩沉降过大
		8	相邻桥桩差异沉降风险
		9	桥梁结构损伤风险
		10	高铁轨道变形风险
U ₃	盾构隧道与高架桥相互作用风险	11	附属设施损害风险
		12	近距离下穿叠加扰动风险
		13	两区间施工扰动风险
		14	运营振动动力影响风险
		15	盾构施工对桥桩变形影响
U ₄	工程地质及周边环境风险	16	盾构施工对桥桩应力影响
		17	地质条件勘探不明风险
		18	细砂层及卵石层风险
		19	地下水流失风险
		20	地表沉降过大
		21	周围建(构)筑物损伤风险
		22	施工扬尘及噪声污染
U ₅	施工监测风险	23	地下水断流或污染
		24	测点布置不良
		25	监控量测信息反馈滞后
		26	量测仪器损坏或精度不良
U ₆	其他风险	27	应变措施和加固措施不当
		28	施工人员安全意识淡薄
		29	施工组织管理风险
		30	工程造价风险
		31	工期延长风险
		32	不可预知因素风险

附录 B
(规范性)

盾构小半径曲线掘进地表变形计算

B.1 盾构小半径曲线掘进力学模型

B.1.1 盾构小半径曲线施工对周围地层的扰动力主要分为：盾构开挖面附加推力 q 、盾壳与周围土体摩擦力 f 、盾尾注浆压力 p ，建立小半径曲线盾构推进力学模型如图B.1所示，图中盾构沿 x 轴正方向水平掘进，开挖面位于 $x=0$ 处的 yo 平面，盾构直径为 D ，盾构机盾壳长度为 L ，隧道轴线埋深为 H 。



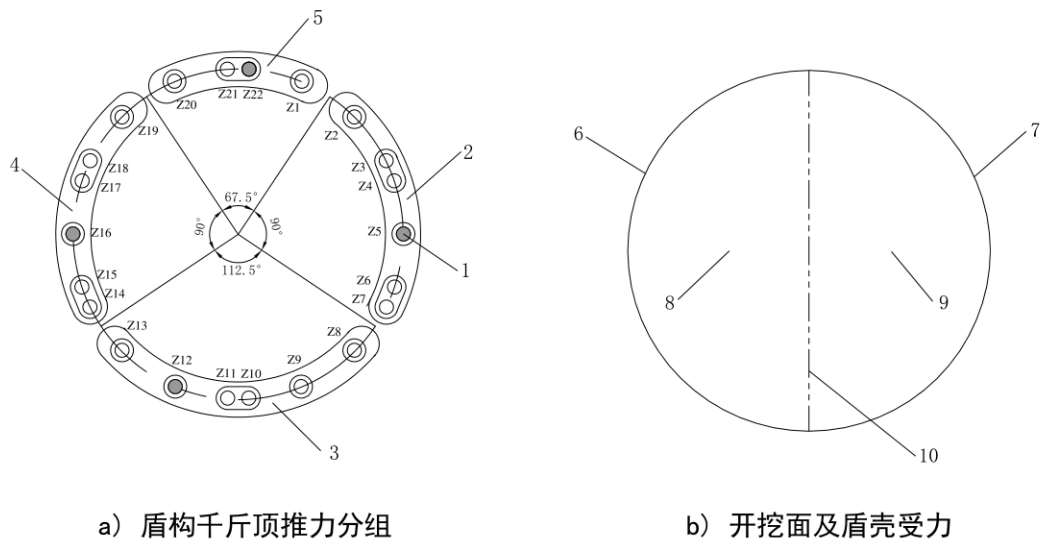
标引序号说明：

- 1——盾尾注浆压力 (p)；
- 2——盾壳摩擦力 (f)；
- 3——开挖面附加推力 (q)；
- 4——盾构掘进方向；
- 5——地面。

图B.1 盾构小半径曲线掘进力学模型

B.1.2 根据Mindlin推导的弹性半空间内任意一点 (x', y', z') 在竖向集中力 P_v 和水平集中力 P_h 作用下的竖向位移计算公式，进行盾构小半径曲线掘进地表变形计算，为了便于分析其施工应力对地层变形的影响，进行如下假设：

- a) 土体不排水且为线弹性半无限空间；
- b) 盾构推进仅考虑空间位置变化，不考虑时间效应；
- c) 盾构曲线掘进过程中，通过设定盾尾千斤顶分组推力及行程来实现盾构姿态偏转。根据盾构机设计资料，千斤顶推力分为4组，分组角度为 67.5° 、 90° 、 112.5° 、 90° ，如图B.2a)所示，其中组D与组B推力相同，组A推力大于组C以实现盾构向左侧转弯；
- d) 开挖面推力由于千斤顶分组的影响而表现出不均匀性，假定开挖面附加推力以刀盘中线为界线，左侧、右侧分别均匀分布，分别为附加推力 q_1 、 q_2 ，且 $q_2 = \xi q_1$ ($\xi \geq 1$)， ξ 为开挖面推力差异系数，如图B.2b)所示；
- e) 由于转弯段线路内侧盾壳挤压土体较严重，假定盾壳与土体之间的摩擦力以隧道中线为界线，左侧、右侧分别均匀分布，分别为摩擦力 f_1 、 f_2 ，且 $f_2 = \eta f_1$ ($\eta \leq 1$)， η 为盾壳摩擦力差异系数，如图B.2b)所示；
- f) 盾尾注浆压力 p 沿管片圆周径向均匀分布，作用范围为盾尾后方1环管片宽度。



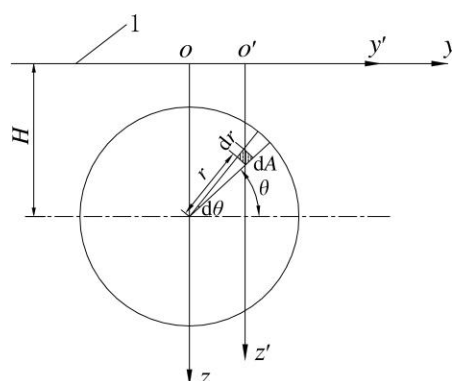
标引序号说明:

- 1——内置位移传感器;
- 2——组A;
- 3——组B;
- 4——组C;
- 5——组D;
- 6——盾壳摩擦力 (f_1);
- 7——盾壳摩擦力 (f_2);
- 8——开挖面附加推力 (q_1);
- 9——开挖面附加推力 (q_2);
- 10——盾构隧道中线。

图B. 2 曲线盾构受力分析

B. 2 开挖面附加推力引起的地表变形

B. 2. 1 对于盾构开挖面正面附加推力, 其计算模型如图B. 3所示, 开挖面中任一微元的面积 $dA = r dr d\theta$, r 为该微元至开挖面中心的距离; θ 为该微元与开挖面中心水平面的夹角。该微元所受集中力为 $dP_h = q r dr d\theta$, q 为某一点的开挖面附加推力; 为求 dP_h 在坐标系 xyz 中某一点 (x, y, z) 处引起的地表竖向位移 dw_2 , 图中Mindlin解 $x'y'z'$ 坐标系的坐标系变换按照公式 (B. 1) 计算。



标引序号说明:

1——地面;

H ——盾构隧道轴线埋深;

dA ——开挖面中任一微元的面积;

r ——微元至开挖面中心的距离;

θ ——微元与开挖面中心水平面的夹角;

dr ——沿开挖面径向微元的长度;

$d\theta$ ——沿开挖面环向微元的角度。

图B.3 开挖面附加推力引起地层变形的计算模型

$$\begin{cases} x' = x \\ y' = y - r \cos \theta \\ z' = z \\ a = H - r \sin \theta \end{cases} \dots\dots\dots (\text{B. 1})$$

B.2.2 根据曲线盾构线路左、右侧附加推力不等而分区间积分, 可得开挖面附加推力引起的地层变形 w_q 按照公式 (B.2) 计算。

$$\begin{aligned} w_q &= \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{x q_1 r}{16\pi G(1-\mu)} d\theta dr + \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{x q_2 r}{16\pi G(1-\mu)} d\theta dr \\ &= \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{x q_1 r}{16\pi G(1-\mu)} \left\{ z \left[\frac{z-H+r\sin\theta}{R_{q1}^3} + \frac{(3-4\mu)(z-H+r\sin\theta)}{R_{q1}^3} - \frac{6z(H-r\sin\theta)(z+H-r\sin\theta)}{R_{q1}^5} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{4(1-\mu)(1-2\mu)}{R_{q1}(R_{q1}+z+H-r\sin\theta)} \right] + \frac{z-H-r\sin\theta}{R_{q1}^3} + \frac{(3-4\mu)(z-H-r\sin\theta)}{R_{q1}^3} \right. \\ &\quad \left. - \frac{6z(H+r\sin\theta)(z+H+r\sin\theta)}{R_{q1}^5} + \frac{4(1-\mu)(1-2\mu)}{R_{q1}(R_{q1}+z+H+r\sin\theta)} \right\} dr d\theta \dots\dots\dots (\text{B. 2}) \end{aligned}$$

其中:

$$R_{q1} = \sqrt{x^2 + (y - r \cos \theta)^2 + (z - H + r \sin \theta)^2} \dots\dots\dots (\text{B. 3})$$

$$R_{q2} = \sqrt{x^2 + (y - r \cos \theta)^2 + (z + H + r \sin \theta)^2} \dots\dots\dots (\text{B. 4})$$

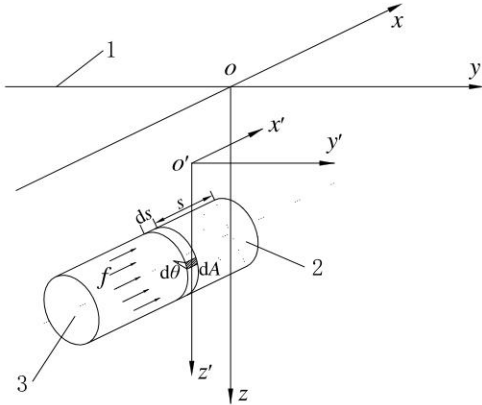
$$R_{q3} = \sqrt{x^2 + (y + r \cos \theta)^2 + (z - H - r \sin \theta)^2} \dots\dots\dots (\text{B. 5})$$

$$R_{q4} = \sqrt{x^2 + (y + r\cos\theta)^2 + (z + H + r\sin\theta)^2} \dots\dots\dots (B. 6)$$

B. 3 盾壳摩擦力引起的地表变形

B. 3. 1 盾壳摩擦力引起的地层变形计算模型如图B. 4所示，对于盾壳上任一微元的面积 $dA = R d\theta ds$ ， R 为盾壳半径； s 为该微元至开挖面的轴向距离。该微元所受集中力为 $dP_h = f R d\theta ds$ ，坐标系变换按照公式(B. 7)计算。

$$\begin{cases} x' = x + s \\ y' = y - R\cos\theta \\ z' = z \\ a = H - R\sin\theta \end{cases} \dots\dots\dots (B. 7)$$



- 标引序号说明：
- 1——地面；
 - 2——盾构开挖面；
 - 3——盾尾；
 - f ——盾壳摩擦力；
 - dA ——盾壳上任一微元的面积；
 - s ——微元至开挖面的轴向距离；
 - ds ——沿盾壳轴向微元的长度；
 - $d\theta$ ——沿盾壳环向微元的角度。

图B. 4 盾壳摩擦力引起地层变形的计算模型

B. 3. 2 根据曲线盾构线路内、外侧盾壳摩阻力不等而分区间积分，可得盾壳摩擦力引起的地层变形 w_f 按照公式(B. 8)计算。

$$\begin{aligned} w_f &= \int_0^L \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \Phi w_2(f_2) + \int_0^L \int_{\frac{\pi}{2}}^{\frac{3\pi}{2}} \Phi w_2(f_1) \\ &= \int_0^L \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{f_2 R d\theta ds (x+s)}{16\pi G(1-\mu)} \left\{ \eta \left[\frac{z-H+R\sin\theta}{R_1^3} + \frac{(3-4\mu)(z-H+R\sin\theta)}{R_2^3} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - \frac{6z(H-R\sin\theta)(z+H-R\sin\theta)}{R_2^3} + \frac{4(1-\mu)(1-2\mu)}{R_2(R_2+z+H-R\sin\theta)} \right] + \frac{z-H-R\sin\theta}{R_1^3} \right. \\ &\quad \left. + \frac{(3-4\mu)(z-H-R\sin\theta)}{R_1^3} - \frac{6z(H+R\sin\theta)(z+H+R\sin\theta)}{R_1^3} + \frac{4(1-\mu)(1-2\mu)}{R_1(R_1+z+H+R\sin\theta)} \right\} \end{aligned} \dots\dots\dots (B. 8)$$

其中:

$$R_{f1} = \sqrt{(x+s)^2 + (y-R\cos\theta)^2 + (z-H+R\sin\theta)^2} \dots\dots\dots (B. 9)$$

$$R_{f2} = \sqrt{(x+s)^2 + (y-R\cos\theta)^2 + (z+H-R\sin\theta)^2} \dots\dots\dots (B. 10)$$

$$R_{f3} = \sqrt{(x+s)^2 + (y+R\cos\theta)^2 + (z-H-R\sin\theta)^2} \dots\dots\dots (B. 11)$$

$$R_{f4} = \sqrt{(x+s)^2 + (y+R\cos\theta)^2 + (z+H+R\sin\theta)^2} \dots\dots\dots (B. 12)$$

B. 4 盾尾注浆压力引起的地表变形

盾构小半径曲线施工线路内侧超挖量较大,盾尾管片与周围土体的建筑间隙较大,需提高注浆量充填盾尾管片外围间隙。在盾尾同步注浆过程中,由于注浆液在间隙中相互贯通,假定注浆压力 p 沿管片圆周径向均匀分布,忽略注浆压力 p 水平分量引起的竖向位移,其竖向分量引起的地表变形 w_p 按照公式(B. 13)计算。

$$w_p = \int_0^s \int_0^{2\pi} \frac{pR \sin\theta d\theta d\theta}{16\pi G(1-\mu)} \left[\frac{3-4\mu}{R_1} + \frac{8(1-\mu)^2 - (3-4\mu)}{R_2} + \frac{(z-H+R\sin\theta)^2}{R_1^3} + \frac{(3-4\mu)(z+H-R\sin\theta)^2 - 2(H-R\sin\theta)z}{R_2^3} + \frac{6z(H-R\sin\theta)(z+H-R\sin\theta)^2}{R_2^3} \right] \dots\dots\dots (B. 13)$$

其中:

$$R_{p1} = \sqrt{(x+s+L)^2 + (y-R\cos\theta)^2 + (z-H+R\sin\theta)^2} \dots\dots\dots (B. 14)$$

$$R_{p2} = \sqrt{(x+s+L)^2 + (y-R\cos\theta)^2 + (z+H-R\sin\theta)^2} \dots\dots\dots (B. 15)$$

式中:

S ——盾尾注浆段长度,单位为米(m),一般取1环管片宽度。

B. 5 地层损失引起的地表变形

B. 5. 1 盾构掘进过程中,刀盘超挖将使盾壳与周围土层间产生一定空隙,造成地层损失进而引起地层松动变形。在盾构直线掘进施工中,地层损失主要体现在盾尾管片脱出、注浆尚未凝固的阶段,其地层损失集中在盾尾处,隧道周围地层损失均匀分布,其引起的地表竖向位移 w_v 按照公式(C. 6)计算。

$$w_v = \frac{V_{loss}}{2\pi} \frac{H}{y'^2 + H^2} \left(1 - \frac{x+L}{\sqrt{(x+L)^2 + y'^2 + H^2}} \right) \dots\dots\dots (B. 16)$$

式中:

V_{loss} ——隧道单位长度的地层损失量,单位为立方米每米(m^3/m)。

B. 5. 2 对于地层损失量 V_{loss} 可根据等效土体损失参数 g 进行计算,如图B. 5所示,在盾构直线施工中, $R' = R - g/2$, R' 为隧道管片结构外半径,地层损失量 V_{loss} 按照公式(B. 17)计算。

$$V_{loss} = \pi R^2 - \pi R'^2 = \pi \left(Rg - \frac{g^2}{4} \right) \dots\dots\dots (B. 17)$$

B.5.3 而对于盾构小半径曲线施工,由于盾构小半径曲线掘进线路内侧超挖较大,会使内侧等效土体损失参数 g 大于外侧,设线路内侧额外超挖量为 δ ,单位为米(m)。因此,由盾构直线施工修正得到的盾构曲线施工等效土体损失参数 g_c 按照公式(B.18)计算。

$$g_c = g + \delta \dots\dots\dots (\text{B. 18})$$

将公式(B.18)中的 g_c 替代式(B.17)中的 g , 可得到曲线盾构的地层损失量按照公式(B.19)计算。

$$V_{loss} = \pi \left[R(g + \delta) - \frac{(g + \delta)^2}{4} \right] \dots\dots\dots (\text{B. 19})$$

根据盾构小半径曲线施工所需间隙的研究,其线路内侧超挖量 δ 按照公式(B.20)计算。

$$\delta = \frac{1}{2} \left[(R_c - R) - \sqrt{(R_c - R)^2 - L_1^2} \right] \dots\dots\dots (\text{B. 20})$$

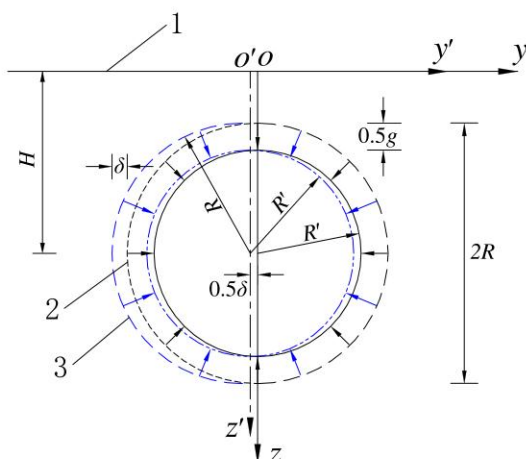
式中:

R_c ——曲线盾构线路的曲线半径,单位为米(m);

L_l ——单段盾壳长度，单位为米（m），考虑盾构机铰接装置的作用，取 $L_l = L/2$ 。

对盾构直线掘进引起的圆柱体均匀分布地层损失理论进行修改, 将坐标系沿 y 轴进行平移, 平移距离为 0.5δ , 进行坐标变换 $y' = y + 0.5\delta$, 得到盾构曲线掘进地层损失引起的地表竖向位移 w_0 按照公式(B.21)计算。

$$w_v = \frac{v_{loss}}{2\pi} \frac{H}{(y+0.5\delta)^2 + H^2} \left(1 - \frac{x+L}{\sqrt{(x+L)^2 + (y+0.5\delta)^2 + H^2}} \right) \dots\dots\dots (\text{B. 21})$$



标引序号说明:

1——地面；

2——盾构直线掘进地层损失;

3——盾构曲线掘进地层损失;

H ——盾构隧道轴线埋深;

R ——盾壳半径;

R' ——盾构隧道管片结构外半径;

g ——盾构直线掘进等效土体损失参数;

δ ——曲线盾构线路内侧额外超挖量。

图B.5 曲线盾构掘进地层损失示意图

B.6 盾构小半径曲线施工总地表变形

盾构小半径曲线掘进施工引起的总地表变形由开挖面附加推力、盾壳与周围土体间摩擦力、盾尾注浆压力以及地层损失引起的地表变形4部分组成，其总变形 w 按照公式(B. 22)计算。

$$w = w_q + w_f + w_p + w_v \cdots \cdots \cdots (B. 22)$$

总地表变形 w 双重积分结果通过Gauss-Legendre数值积分计算得到。

附 录 C
(规范性)
盾构掘进参数设计

C.1 盾构总推力

在盾构平稳掘进时，其总推力 F 按照公式 (C.1) 计算：

$$F = \alpha_F F_t = \alpha_F (F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_5 + F_6) \dots\dots\dots (C.1)$$

式中：

- α_F ——盾构总推力修正系数，通过推力实测值与理论计算值的比值得到；
- F_t ——盾构总推力理论计算值；
- F_1 ——盾构侧面与周围地层的摩阻力；
- F_2 ——盾构掘进的正面阻力；
- F_3 ——管片和盾尾间的摩擦阻力；
- F_4 ——切口环贯入地层的贯入阻力；
- F_5 ——盾构姿态调整或转向附加阻力；
- F_6 ——牵引后配套拖车的牵引阻力。

在盾构实际施工中， F_4 、 F_5 、 F_6 的影响较小，为便于工程应用可不予考虑，影响盾构总推力的主要组成部分为 F_1 、 F_2 、 F_3 ， F_1 按照公式 (C.2) 或 (C.3) 计算， F_2 按照公式 (C.4) 计算， F_3 按照公式 (C.5) 计算。

对于黏性土地层， F_1 按照公式 (C.2) 计算。

$$F_1 = \pi D_l L c \dots\dots\dots (C.2)$$

式中：

- D_l ——盾壳外径；
- L ——盾壳总长度；
- c ——盾壳周围土体的黏聚力。

对于高渗透性地层中掘进，作用在盾壳上的土压力应按有效重度计算， F_1 按照公式 (C.3) 计算。

$$F_1 = f \gamma' D_l \left[2(1 + K_a) H - \frac{1}{4} D_l (\pi + 2K_a) \right] L + f W \dots\dots\dots (C.3)$$

式中：

- f ——钢板与土体的摩擦系数；
- γ' ——土体有效重度；
- K_a ——主动土压力系数；
- H ——盾构轴线埋深；
- L ——盾构主机长度；
- W ——盾构主机总重。

对于面板式盾构机， F_2 按照公式 (C.4) 计算。

$$F_2 = \lambda \frac{\pi D_d^2}{4} p + (1 - \lambda) \frac{\pi D_d^2}{4} (p + p') \dots\dots\dots (C.4)$$

式中：

- D_d ——刀盘直径；
- λ ——刀盘开口率；

p ——土仓压力平均值;

p' ——面板上的压力附加值。

根据盾尾管片、盾尾刷与盾壳的摩擦力关系, F_3 按照公式(C.5)计算。

$$F_3 = n_1 W_s \mu_s + \pi D_s b P_T n_2 \mu_s \cdots \cdots \cdots (C.5)$$

式中:

n_1 ——盾尾内管片的环数;

W_s ——每环管片的重量;

μ_s ——盾尾刷与管片的摩擦系数, 一般取值0.3~0.5;

D_s ——管片外径;

b ——每道盾尾刷与管片的接触长度;

P_T ——盾尾刷内的油脂压力;

n_2 ——盾尾刷的层数。

C.2 刀盘扭矩

盾构机刀盘在切削岩、土体过程中, 其刀盘扭矩 T 按照公式(C.6)计算。

$$T = \alpha_T T_t = \alpha_T (T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + T_5 + T_6 + T_7 + T_8) \cdots \cdots \cdots (C.6)$$

式中:

α_T ——盾构掘进的刀盘扭矩修正系数, 通过刀盘扭矩实测值与理论计算值的比值得到;

T_t ——刀盘扭矩理论计算值;

T_1 ——刀盘切削土体扭矩;

T_2 ——刀盘正面与土体间摩擦扭矩;

T_3 ——刀盘圆周面的摩擦扭矩;

T_4 ——刀盘背面与土仓内土体摩擦扭矩;

T_5 ——刀盘搅拌阻力矩;

T_6 ——刀盘开口槽的剪切力矩;

T_7 ——刀盘轴承扭矩;

T_8 ——密封装置摩擦扭矩。

在盾构实际掘进中, T_1 、 T_2 、 T_3 是影响刀盘扭矩的最主要组成部分, 分别按照公式(C.7)~公式(C.9)计算。

T_1 按照公式(C.7)计算。

$$T_1 = \frac{D_d^2 v}{8 \omega} \left[p \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) + 2 c \tan \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) \right] \cdots \cdots \cdots (C.7)$$

式中:

v ——盾构掘进速度;

ω ——刀盘转速;

φ ——土体内摩擦角。

在黏性土中, T_2 按照公式(C.8)计算。

$$T_2 = \frac{\pi D_d^3}{12} K_0 f \gamma H (1 - \lambda) \cdots \cdots \cdots (C.8)$$

式中:

K_0 ——静止土压力系数;

f ——刀盘正面与土体间的摩擦因数;

γ ——土体重度；
 H ——地表到盾构机轴线距离。

由于刀盘旋转过程中难以与周围土体粘结，可以忽略刀盘圆周土体粘聚力的影响， T_3 按照公式(C. 9)计算。

$$T_3 = \frac{\pi D_d^2}{4} B \gamma H \mu_d (1 - K_0) \dots\dots\dots (C. 9)$$

式中：
 B ——刀盘圆周的厚度；
 μ_d ——刀盘圆周与土体的摩擦系数。

C. 3 同步注浆量

盾构掘进每环管片的注浆量 Q 按照公式(C. 10)计算。

$$Q = \alpha_Q Q_t = \alpha_Q \frac{\pi(D_d^2 - D_s^2)}{4} l \dots\dots\dots (C. 10)$$

式中：
 α_Q ——盾构施工同步注浆量的填充系数，可根据地质条件、施工水平、浆液类型等确定；一般以黏性土为主的地层充填系数取1.30~1.80，以砂性土为主的地层、或裂隙比较发育或地下水量大的岩层地段，充填系数一般取为1.50~2.50。
 Q_t ——每环管片的理论注浆量（ m^3 ），即每环管片的建筑空隙；
 D_d ——盾构机刀盘直径；
 D_s ——盾构隧道管片外径；
 l ——每环管片宽度。

C. 4 掘进出土量

盾构掘进每环管片的出土量 U 按照公式(C. 11)计算。

$$U = \alpha_U U_t = \alpha_U \frac{\pi D_d^2}{4} l \dots\dots\dots (C. 11)$$

式中：
 α_U ——盾构施工掘进出土量修正系数，通过每环管片的实际出土量与每环管片理论建筑空间的比值得到；
 U_t ——每环管片的理论出土量。

C. 5 土仓压力

盾构掘进的土仓压力 P 按照公式(C. 12)计算。

$$P = \alpha_P P_t = \alpha_P K_0 \gamma H \dots\dots\dots (C. 12)$$

式中：
 α_P ——济南地区盾构施工的土仓压力修正系数，通过实际土仓压力与隧道轴线处的静止土压力的比值得到；
 P_t ——盾构轴线处的静止土压力。

示例：
 以济南轨道交通 1 号线玉符河站~王府庄站区间盾构法施工为示例。盾构机为单圆土压平衡盾构机，盾壳总长度 $L=8.4m$ ，盾壳外径 $D_1=6.64m$ ，刀盘直径 $D_d=6.68m$ ，管片外径 $D_s=6.4m$ ，每环管片宽度 $l=1.2m$ ；穿越地层平均黏聚力

$c=45\text{ kPa}$ ，内摩擦角 $\varphi=23^\circ$ ，静止土压力系数 $K_0=0.39$ ，地表到盾构机轴线距离 $H=12.4\text{ m}$ ，轴线上方土体重度加权平均值 $\gamma=18.9\text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$ ；刀盘开口率 $\lambda=40\%$ ，刀盘圆周厚度 $B=0.65\text{ m}$ ，刀盘正面与土体间摩擦因数 $f=0.18$ ，刀盘圆周与土体的摩擦系数 $\mu_d=0.09$ ，土仓压力平均值 $p=K_0\gamma H=91.4\text{ kPa}$ ，面板上的压力附加值 $p'=20\text{ kPa}$ ；盾尾内管片环数 $n_1=3$ ，每环管片重量 $W_s=172.4\text{ kN}$ ，盾尾刷与管片的摩擦系数 $\mu_s=0.35$ ，盾尾刷层数 $n_2=3$ ，每道盾尾刷与管片接触长度 $b=0.2\text{ m}$ ，盾尾刷内油脂压力 $P_T=0.38\text{ MPa}$ ；平均掘进速度 $v=40\text{ mm/min}$ ，平均刀盘转速 $\omega=1\text{ rpm}$ 。代入上述示例相关参数计算得到各掘进参数的理论计算值，然后根据盾构掘进实测数据确定实测数据主要分布范围，计算得到相应参数修正系数，然后确定在该类地层和类似工程中的盾构法施工掘进参数主控范围，计算结果见表 B.1。

表C.1 黏性土地层盾构掘进参数控制范围

掘进参数	理论计算值	实测数据范围	修正系数	主控范围
盾构总推力/kN	13 287.79	8 000~11 000	0.677~0.753	9 000~10 000
刀盘扭矩/kN·m	1 587.17	1 200~2 300	0.882~1.260	1 400~2 000
同步注浆量/ m^3	3.45	4.3~6.5	1.304~1.739	4.5~6.0
掘进出土量/ m^3	42.03	48~60	1.237~1.332	52~56
土仓压力/bar	0.92	0.8~1.7	0.978~1.413	0.9~1.3

附 录 D
(资料性)
盾构隧道下穿高架桥监测项目

城市轨道交通盾构隧道下穿高架桥监测项目见表D. 1。

表D. 1 城市轨道交通盾构隧道下穿高架桥监测项目

类别	监测项目	监测方式	测点布置
必测项目	开挖面观测描述	观测、记录	观测开挖面稳定程度
	地表沉降	精密水准仪、钢尺	高架桥影响范围，每 5 m~10 m 设一断面；其余地段每 50 m 设一断面
	拱顶沉降、上浮	精密水准仪、钢尺	
	管片结构收敛	收敛计	
	地下管线	精密水准仪	沿管线 10 m 一个
	桥墩水平变形	测量机器人	高架桥墩柱顶部
	桥墩竖向变形	静力水准仪	高架桥墩柱墩身
	桥墩差异变形	静力水准仪	高架桥墩柱墩身
	桥墩倾斜	倾斜传感器	高架桥墩柱顶部
	轨道静态几何形位	晶硅式静力水准仪	沿高铁线路方向 5 m 一个
选测项目	土体分层竖向位移	磁环分层沉降仪	每 20 m 设一断面，必要时需加密
	土体深层水平位移	测斜仪	每 20 m 设一断面，必要时需加密
	管片结构应力和变形	压力计和传感器	每 50 m~100 m 设一断面，必要时需加密
	地层压应力	压力计和传感器	每一代表性地段设一断面
	孔隙水压力	孔隙水压计	高架桥周边区域
现场巡查	a) 建(构)筑物、桥梁墩台或梁体、既有轨道交通结构等的裂缝位置、数量和宽度，混凝土剥落位置、大小和数量，设施的使用状况； b) 地下构筑物积水及渗水情况，地下管线的漏水、漏气情况； c) 周边路面或地表的裂缝、沉陷、隆起、冒浆的位置、范围等情况； d) 河流湖泊的水位变化情况，水面出现被涡、气泡及其位置、范围，堤坡裂缝宽度、深度、数量及发展趋势等； e) 工程周边开挖、堆载、打桩等可能影响工程安全的生产活动。		