

ICS

点击此处添加中国标准文献分类号

DB 37

山东省地方标准

DB ××/T ××××—××××

城市轨道交通盾构隧道下穿高架桥施工风险控制技术规程

点击此处添加与国际标准一致性程度的标识

(征求意见稿)

××××—××—××发布

××××—××—××实施

山东省市场监督管理局 发布

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 基本要求	3
5 风险辨识及分级	4
6 勘察阶段风险控制	5
7 施工阶段风险控制	9
8 监控量测	11
附录 A（资料性附录） 盾构隧道穿越桥梁施工风险清单	14
附录 B（资料性附录） 盾构隧道穿越桥梁监测项目	15
附录 C（资料性附录） 盾构小半径曲线掘进地表变形计算	16
附录 D（资料性附录） 盾构掘进参数设计	22

前 言

本标准按照GB/T 1.1-2009给出的规则起草。
本标准由山东省交通运输厅提出、归口并组织实施。
本标准起草单位：
本标准主要起草人：

城市轨道交通盾构隧道下穿高架桥施工风险控制技术规程

1 范围

本标准规定了城市轨道交通盾构法隧道穿越桥梁风险控制的基本要求、风险辨识及分级、勘察设计阶段风险控制、施工阶段风险控制、监控量测。

本标准适用于山东省行政区域内，城市轨道交通盾构法隧道穿越铁路、公路、市政桥梁工程的设计、施工与监测。

城市轨道交通盾构法隧道穿越桥梁工程设计、施工与监测除应符合本规程外，尚应符合国家和山东省现行有关标准的规定。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是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 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 51256 桥梁顶升移位改造技术规范
- CJJ 99 城市桥梁养护技术标准
- TB 10182 公路与市政工程下穿高速铁路技术规程
- JTG H11 公路桥涵养护规范
- JTG/T J22 公路桥梁加固设计规范
- CECS 295 建（构）筑物托换技术规程

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

桥梁 viaduct

一种桥梁，指搁在一系列狭窄钢筋混凝土或圬工拱上，具有高支撑的塔或支柱，跨过山谷、河流、道路或其他低处障碍物的桥梁。

3.2

盾构姿态 position and stance

盾构的空间状态，通常采用横向偏差、竖向偏差、俯仰角、方位角、滚转角和切口里程等数据描述。

3.3

地层损失 ground loss

盾构施工中实际开挖的土体体积与理论开挖土体体积之差。

3.4

风险 risk

危害发生的频率及造成损失的严重程度的组合。

3.5

风险识别 risk identification

对存在于工程项目中的风险因素（事件）进行确认和分类或调查工程建筑中潜在的风险类型、事故发生地点、时间及原因，并进行系统的筛选、分类。

3.6

风险评估 risk assessment

对存在于工程项目中的风险因素（事件）进行确认和分类或调查工程建筑中潜在的风险类型、事故发生地点、时间及原因，并进行系统的筛选、分类。

3.7

风险防控 risk prevention and control

在风险识别与风险评估的基础上，针对工程中风险等级较高、事故后果严重的风险因素进行防范与调控，尽量减少或消除风险的发生概率及后果危害。

3.8

风险监控 risk monitoring

利用监控量测技术对隧道施工进行全过程监控，建立合理的预报预警制度，在紧急情况时启动相应的应急预案以重新满足预期目标。

3.9

安全预警 safety pre-warning

在风险事故发生前预先进行警告，对可能发生的危险进行事先预报预警，以引起施工人员与管理者的注意并提前采取相应的防护及加固措施。

3.10

安全控制 safety control

分析潜在的危害，从技术上和管理上采取措施，使系统在实施或使用过程的风险始终处于可接受状态的行为过程。

3.11

隔离桩 isolation pile

DB ××/T ××××—××××

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。

3.12

注浆 grouting

利用灌浆压力或浆液自重，经过钻孔将能固化的浆液注入到岩土地基的裂隙或孔隙中，以改善其物理力学性质的方法。

3.13

桥梁顶升 bridge jacking

桥梁顶升是指通过千斤顶及其他辅助设备，在不改变原桥梁形态的前提下，将桥梁安全地顶起升高至所需高度的一种桥梁纠偏技术。

3.14

桥梁基础托换 bridge foundation underpinning

根据工程的某种需要，对已有桥梁基础进行加强或重新设置新的基础工程的总称。

3.15

桥梁加固 bridge reinforcement

当桥梁构造物局部损坏或承载力不足时进行的修复和补强工程措施。

4 基本要求

4.1 盾构法隧道穿越桥梁工程，应具备以下条件：

- 详细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的调查报告；
- 既有桥梁的设计资料、荷载情况等调研资料；
- 施工所需的设计图纸资料和工程技术要求文件。

4.2 盾构隧道穿越桥梁设计、施工、监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、合理选型、优化设计、精细控制、动态监控。

4.3 城市轨道交通盾构法隧道穿越桥梁工程应由建设单位组织勘察、设计、监理、施工等单位实施，并可委托具有相应资质和经验的单位提供第三方监测、安全风险评估等技术或管理服务。各方应把保证安全作为首要目标，合理分配资源，实现系统的安全性、可靠性、可用性和可维护性。

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。

4.5 城市轨道交通盾构法隧道穿越桥梁工程各阶段均应开展安全风险技术管理工作，包括：

- 建设规划及可行性研究阶段应按 GB 50652-2011 以规避风险为原则，对线路走向、埋深及设计方案进行研究；
- 勘察设计阶段应以规避和降低风险为原则进行多方案比选，选择安全合理、技术可靠、工艺成熟、对桥梁结构扰动影响小的结构形式和技术措施，必要时通过风险工程专项设计及安全风险评估制定有效的风险控制措施；

——施工阶段应以控制风险为原则，依据设计文件、施工规范标准，制定专项施工方案，并严格按照审批的施工方案进行施工，加强施工组织管理，开展工程监测、现场巡视、安全风险状态评价、预警、响应及处置等施工安全风险控制工作。

5 风险辨识及分级

5.1 一般要求

5.1.1 风险辨识宜对影响工程安全的风险因素和可能导致的风险事件进行识别。

5.1.2 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，结合建设规模、技术经济和社会发展水平、建设管理经验等确定。

5.1.3 工程自身风险 and 周边环境风险的等级应分别确定。工程自身风险分为一级、二级和三级，环境风险分为一级、二级和三级。

5.1.4 风险辨识和分级可采用事故树法、检查表法（盾构隧道穿越桥梁施工风险清单见附录 A）、工程类比法、专家调查法和模糊综合评判法等方法。

5.2 工程自身风险辨识与分级

5.2.1 工程自身风险辨识与分级宜根据工程规模、施工工法、结构型式、工程地质及水文地质条件等因素确定。

5.2.2 城市轨道交通盾构法隧道穿越桥梁工程宜以盾构隧道相互之间的空间位置关系、地质条件的适宜性以及工程部位等为基本依据，并根据工程地质及水文地质条件、盾构机型式等进行修正。盾构法隧道的工程自身风险分级宜符合表 1 的规定。

表1 盾构法结构的工程自身风险分级表

自身风险等级	基本分级条件	分级修正 ^a
一级	较长范围处于非常接近状态(隧道净距 $L \leq 0.3D$) 的并行或交叠盾构隧道	1. 对以下情况，可上调一级： (1) 地质条件复杂（岩溶等）； (2) 线路条件复杂（小半径曲线）； (3) 大直径盾构隧道（内径大于 6m）； 2. 当地质条件简单时，可下调一级。
二级	较长范围处于接近状态($0.3D < \text{隧道净距} L \leq 0.7D$) 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	
三级	一般的盾构法区间隧道	
^a 风险等级修正时，最多只能调整一个等级。		

5.2.3 工程地质及水文地质条件风险应重点分析不良地质、特殊性岩土、地下水等不利于工程实施的条件及其对工程的影响。

5.3 工程环境风险辨识与分级

5.3.1 环境风险分级宜根据桥梁重要性、与城市轨道交通工程结构的接近程度、桥梁的状况，依据轨道交通建设对桥梁的影响程度大小综合确定。环境风险分级宜符合表 2 的规定。

表2 环境风险分级表

桥梁重要性	接近关系				分级修正
	接近	较接近	一般	不接近	

极重要	一级	一级	二级	三级	1. 当自身风险等级为一级或桥梁现状安全性较差时，应上调一级； 2. 当桥梁在建时与新建城市轨道交通工程设计有过相关配合或预留了一定穿越条件等情况时，可下调一级。
重要	一级	二级	二级	三级	
较重要	二级	二级	三级	四级	
一般	三级	三级	四级	四级	

5.3.2 桥梁的重要性依据桥梁的类型、功能、使用性质、特征、规模等综合确定，并分为极重要、重要、较重要、一般四级。桥梁重要性分级宜符合表3的规定。

表3 桥梁重要性分级表

环境设施重要性	基本条件	修订
极重要	轨道交通桥梁、高速铁路桥梁	1. 当桥梁为简支梁桥，重要性等级可下调一级； 2. 铁路桥梁道岔区，重要性等级应上调一级。
重要	普通铁路桥梁、高速公路桥梁、城市快速路桥梁	
较重要	城市主干路、次干路桥梁	
一般	匝道桥、人行天桥	

5.3.3 桥梁与新建城市轨道交通结构的接近程度宜用接近关系表示，分为接近、较接近和一般三级。桥梁与新建城市轨道交通结构的接近关系分级宜符合表4的规定。

表4 桥梁与新建城市轨道交通结构接近程度关系表

桥梁基础	接近关系		
	接近	较接近	一般
	隧道正上方 0.5D(含)范围内；隧道外侧 0.3D(含)范围内	隧道正上方 0.5D~1.0D(含)范围内；隧道外侧 0.3D~0.7D(含)范围内	隧道正上方 > 1.0D；隧道外侧 0.7D~1.0D(含)范围内

5.3.4 桥梁状况可根据环境设施已使用年限和当前结构完好状况等确定，宜通过一般判断或专项检测等综合确定。

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，可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 勘察设计阶段风险控制

6.1 一般要求

6.1.1 市轨道交通工程立项或可行性研究阶段，建设单位应将穿越桥梁工程设计方案向产权单位征求意见。

6.1.2 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。一级环境风险工程应进行专项设计。对工程自身风险和其他等级环境风险工程，应在设计文件中体现安全风险分析与控制相关内容。专项设计文件应包含但不限于以下内容：

- 风险等级校核；
- 施工影响分析；
- 桥梁防护措施；
- 桥梁监测项目控制值及要求；
- 设计及施工中应注意的重点部位和环节等内容。

6.1.3 初步设计和施工图设计阶段编制的一级环境风险工程专项设计，建设单位应委托相应资质的技术评价单位对其专项设计方案进行安全评估。

6.1.4 设计单位应当在设计文件中注明涉及危大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，设计单位对施工、监理、第三方监测等单位进行设计文件交底时，应对工程风险进行重点说明，并对一级风险工程进行专项交底。

6.1.6 施工过程中，设计单位应派遣专业技术人员配合施工，及时解决施工中与工程风险有关的设计问题。

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、地质风险单元划分、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，且常规勘察工作无法解决；
- 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过程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，设计单位应明确提出调查的范围、对象、内容及成果要求等。

6.2.4 环境调查工作完成后应形成环境调查成果。环境调查成果宜包括工程概况、调查范围和对象、周边环境基本情况及统计、相关图纸及现场照片资料。

6.2.5 建设单位应组织设计等单位对勘察成果文件和环境调查成果进行评审验收。

6.2.6 一级环境风险工程宜对桥梁工程进行检测、评估，形成检测和评估报告。

6.3 变形控制指标

6.3.1 桥梁变形控制值的确定，应符合以下要求：

- 桥梁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，结合其与工程的空间位置关系、已有沉降、差异沉降和倾斜以及当地工程经验进行确定，并应符合 CJJ 99 的有关规定；
- 桥梁的水平位移、沉降、差异沉降和倾斜控制值宜通过结构检测、计算分析和安全性评估确定。

6.3.2 高速铁路桥梁墩顶位移应根据穿越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，且应符合 TB 10182 中相关规定。

6.3.3 一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，并结合专家审查意见给出。

6.4 线路设计要求

6.4.1 穿越桥梁工程盾构隧道线路设计需综合考虑穿越地质条件、空间关系、轨道交通运营维护等因素。

6.4.2 盾构隧道线路平面宜顺直，与桥梁工程宜为正交；当长距离并行穿越时，应采取相应工程措施减少盾构施工对桥梁的影响。

6.4.3 盾构隧道线路纵段在穿越区段宜避免穿越不良地质，确因条件限制无法避开不良地层时，应结合所处的地质条件进行分析，必要时可采取地层加固等其它防护措施。

6.4.4 隧道左右线不宜在同跨桥梁穿越，如确需在同跨桥梁穿越，应采取相应工程措施减少盾构施工对桥梁的影响。

6.5 防护措施设计要求

6.5.1 穿越桥梁段应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、以及技术经济性等因素进行论证，经多方案比选后采用隔离桩、地层预加固、桥梁顶升、桥梁基础托换、桥梁加固等防护措施。穿越桥梁工程防护措施不应采用挤土类桩。

6.5.2 隔离桩的防护措施设计，应符合以下要求：

- 穿越高速铁路桥梁且小于 1.0 倍隧道宽度时，应采取隔离桩防护措施；穿越其他类型桥梁，在地层条件良好，且具备隔离桩施工空间的前提下可以采用隔离桩；
- 宜采用钻孔桩，其与桥梁基桩的距离应满足 TB 10182 中相关规定，与隧道结构间的净距不应小于 0.5 m；
- 隔离桩顶宜设置钢筋混凝土冠梁，并在两排隔离桩间冠梁位置设置横撑，隔离桩间土体应进行加固处理；
- 隔离桩沿隧道线路方向的设置范围应超出桥梁承台两端各 1.5 倍隧道宽度。

6.5.3 地层加固可采用地层注浆、深层搅拌、高压旋喷等加固方式，地层加固应进行现场或室内试验检验其实施效果。加固要求见表 5。

表5 各类加固方式要求汇总表

加固方式	工作要求
地层注浆加固	<p>(1) 注浆加固法宜适用于砂性土、淤泥质粘土、粉土、粘性土、强风化岩和一般填土层；</p> <p>(2) 注浆加固设计应根据地层条件、施工环境、加固目的等确定相应的注浆方法、注浆材料和注浆范围；</p> <p>(3) 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；</p> <p>(4) 注浆钻孔宜采用梅花形布置，口径70~120 mm，间距0.6~1.8 m。垂直精度应小于1%，注浆顺序宜先外围，后中间；</p> <p>(5) 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；</p> <p>(6) 加固后地层无侧限抗压强度不宜小于1.0 MPa，现场应对加固效果进行检查。</p>
深层搅拌加固	<p>(1) 深层搅拌法宜用于处理淤泥质粘土、淤泥质粉质粘土和含水量较高、地基承载力小于0.12 MPa的粘土、粉质粘土、粘质粉土等软土地层。</p> <p>(2) 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。</p> <p>(3) 搅拌桩的垂直度偏差不得大于1.5%，桩位偏差不得大于50 mm，桩径偏差不得大于4%。</p> <p>(4) 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。</p>
高压旋喷加固	<p>(1) 高压旋喷加固宜用于淤泥质粘土、淤泥质粉质粘土、粘质粉土、砂质粉土、粉砂等地层；</p> <p>(2) 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0.5 D范围（D为隧道外径）；</p> <p>(3) 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；</p> <p>(4) 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；</p> <p>(5) 高压旋喷桩钻孔垂直度偏差不得大于1.5%。桩位和桩体直径偏差不得大于50 mm。桩身中心允许偏差不得大于0.2 d（d为设计桩径）；</p> <p>(6) 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。</p>

6.5.4 桥梁顶升的防护措施设计，应符合以下要求：

- 桥梁顶升工程设计前，应进行现场调查、地基勘察，收集相关资料，对原结构进行检测、鉴定和抗震评估，鉴定和评估结论中应提出桥梁结构加固的建议；
- 对既有桥梁进行顶升设计时，其材料参数取值、作用及其组合，以及验算方法均可采用该桥原设计的相关规定，其中材料参数取值应根据材料劣化情况进行确定；
- 桥梁顶升过程中的临时结构、构件及临时措施，应按国家现行标准的有关规定进行设计；
- 桥梁顶升施工期间应控制原结构的沉降量和对原结构的损伤；
- 施工完成后的桥梁应满足原设计既有的各项指标，同时宜满足国家现行标准的规定；
- 桥梁顶升移位宜采用整体同步控制系统实施顶升，特殊情况可采用千斤顶人工控制顶升；
- 桥梁顶升设计应根据结构特点、工程条件、改造目的、技术要求及检测鉴定结论等，选择相应的技术方案；
- 桥梁顶升设计不宜改变结构原有受力体系，不宜损伤原桥受力结构；当需改变受力体系或对结构有所损伤时，应对相应的结构或构件进行加固设计和验算。同时应对顶升过程中及完成后的整体结构及局部构件进行强度、刚度和稳定性验算，并应计入临时结构的影响；
- 顶升设计的结构验算应采用国家现行标准的各类作用值及相应组合值；
- 对顶升前经技术状态鉴定或抗震验算不能满足设计要求的既有结构，应在顶升设计的同时进行抗震加固；
- 设计文件中应提供顶升过程中的控制及监控指标，并应提出施工技术要求和临时性安全措施；
- 桥梁顶升尚应符合 GB/T 51256 中相关规定。

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，应进行现场调查、收集相关资料，并对原有地基补充勘察，对结构进行必要的检测；
- 桥梁基础托换设计应以既有桥梁的鉴定结论为依据，充分利用既有桥梁的承载力，并应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；
- 临时托换结构设计时，荷载取值应根据施工期间的实际荷载确定；
- 桥梁基础托换设计应根据上部结构、基础和地基的共同作用，并应经技术经济分析比较确定。必要时进行专门论证；
- 桥梁基础托换设计应对托换体系的承载力要求、整体稳定性进行验算，并应满足国家现行有关标准的规定；
- 桥梁基础托换设计尚应符合 CECS 295 中相关规定。

6.5.6 桥梁加固，应符合以下要求：

- 桥梁经过技术状况评定及承载能力鉴定，确认经过加固能满足结构安全或正常使用要求，方可进行加固，加固工作的内容及范围应根据评定结论和使用要求确定；
- 桥梁加固应尽可能不损伤原结构，避免不必要的拆除及更换，防止加固中造成新的结构损伤或病害；
- 有抗震要求的桥梁，加固时还应进行抗震能力验算；
- 加固施工方法、流程、工艺的设计，应考虑结构或构件出现倾斜、失稳、坍塌等的可能性，并采取有效措施；
- 特大桥、大桥主要承重构件加固时，应作多方案的技术、经济比较；
- 桥梁加固尚应符合 JTG/T J22、CJJ 99、JTG H11 中相关规定。

6.5.7 隧道覆土厚度不宜小于 1D（D 为隧道外径），并行隧道间的净距不宜小于 1D（D 为隧道外径）；当隧道覆土厚度以及相邻隧道间距离不能满足要求时，应结合隧道所处的地质和环境条件进行分析，必要时应采取相应加强措施。

6.5.8 隧道的工作井、联络通道及泵房等附属工程不应设置在桥梁安全保护区内。当设置于桥梁影响区内时，应采取可靠措施确保桥梁安全。

6.5.9 桥梁影响区内的隧道宜加强结构强度和防水措施。

6.5.10 隧道施工应在隔离桩及其它加固措施达到设计强度要求后实施。

6.5.11 壁后注浆，应符合以下要求：

- 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，并应根据地层特点、结构受力及变形要求、环境控制和现场具体情况等分一次或多次完成；
- 壁后注浆应满足固结强度、凝结时间、可填充性、流动性、收缩率和环保要求。注浆材料应根据地质条件、工程要求、周边环境及现场具体情况等综合选用；
- 注浆压力应根据地质条件、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。通常注浆压力值为在地层阻力强度的基础上增加 0.1~0.2 MPa；
- 同步注浆量宜按下式计算：

$$Q = \alpha V \dots\dots\dots (1)$$

式中 Q —注浆量 (m^3)；

α —充填系数，可根据地质条件、施工水平、浆液类型等采用 1.3~2.5；

V —每环管片的建筑空隙体积 (m^3)。

- 二次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；
- 二次注浆的注浆量和注浆压力应根据环境条件和沉降监测结果等确定；
- 为保证隧道二次注浆质量，必要时可在管片上增设预留注浆孔；
- 设计应对注浆时机、注浆材料、注浆压力、注浆量及注浆填充效果等提出要求。

7 施工阶段风险控制

7.1 一般要求

7.1.1 穿越桥梁施工前应根据设计提出的风险等级编制专项施工组织方案，对于二级以上风险，尚应编制风险应急处置预案。

7.1.2 穿越桥梁施工应建立施工测量和监控量测系统，并及时反馈信息。

7.1.3 对于一级环境风险，隧道施工前应选择类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土量、盾构姿态及土层变形。

7.2.2 掘进施工的同时，应同步进行盾尾注浆，充填管片与土体间的建筑空隙，并根据注浆填充效果进行壁后二次补偿注浆。

7.2.3 盾构曲线段掘进施工时，应采取措施减小成型管片的横向和竖向位移对盾构隧道轴线的影

7.2.4 盾构施工应按设定的参数沿设计轴线掘进，并应详细记录。

7.2.5 运转并验收合格后，一次性连续完成穿越施工。

7.3 掘进姿态控制

7.3.1 盾构穿越桥梁施工过程中，应做好管片选型，对推进油缸进行合理编组，控制油缸压力值和千斤顶行程差；应控制盾构姿态，及时纠偏，不应急纠猛纠。

7.3.2 应对盾构姿态及管片状态进行测量和人工复核，并详细记录。当盾构轴线偏离设计轴线时，应及时采取措施进行纠偏：

- 盾构纵坡和平面的最大纠偏量应小于 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，防止过量纠偏而损坏成型管片和盾尾密封；
- 盾构自转应控制在 $\pm 1^\circ$ 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或使用仿行刀适量超挖或反转刀盘等措施调整盾构姿态；在软土及砂土地层不宜采用仿行刀超挖来调整盾构姿态。

7.3.3 盾构在穿越桥梁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，具体措施如下：

- 盾构前方地层发生沉降或较大隆起超过报警值；
- 盾构本体滚动角超过 3° ；
- 盾构轴线偏离隧道设计轴线超过 ± 50 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。

7.3.4 盾构隧道在穿越桥梁施工过程中同时存在盾构小半径曲线掘进时，应制定相应的小半径曲线施工控制措施：

- 使用先行刀进行超挖时，应合理控制超挖量；
- 应防止由于盾构推进反力不均引起的管片环变形、移动、管片错台、管片开裂及渗漏水等；
- 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计算见附录 C。

7.4 掘进参数控制

7.4.1 盾构法穿越桥梁施工前，应根据隧道工程地质及水文条件、隧道埋深、线路曲率及坡度、桥梁结构特点、桥隧间距位置、盾构姿态、地表环境、试掘进段经验参数制定穿越过程掘进参数，并根据施工监测动态反馈调整。掘进参数管理如表 6 所示，掘进参数计算见附录 D 所示。

表6 盾构掘进参数管理

项目		掘进管理内容
开挖管理	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
线型管理	盾构姿态	俯仰角、偏角、偏转、中折角度、曲行量、超挖量
注浆回灌管理	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

管片拼装管理	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 应根据不同的地层选择不同的掘进模式，具体要求如下：

- 土压平衡盾构在软土地层或含水量较大的地段应使渣土填满土仓；在“上软下硬”地层中，应控制土仓接近满仓掘进，但土仓要留有一定空隙；在石灰岩地层中，宜控制土仓为半仓或2/3仓掘进；
- 泥水平衡盾构掘进时，开挖仓的水土压力与泥浆压力应保持平衡，排渣量与开挖量、泥浆注入量保持动态平衡，并根据掘进情况进行调整。

7.4.3 盾构掘进速度应与地表控制的沉降值、进出土量、开挖面土压力值及同步注浆等相协调。

7.4.4 盾构穿越桥梁施工期间的掘进参数应在参考正常段掘进参数的基础上，结合穿越施工实际条件及变形控制要求来制定。近距离穿越桥梁期间，应提前做好姿态调整，做好渣土改良，避免长期停机；做好同步注浆控制，管片螺栓复紧等工作。掘进速度应维持连续平稳，降低地层损失率。

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。

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，并做好记录。

7.5.3 隧道轴线施工允许偏差应为 ± 50 mm。

7.5.4 盾构掘进引起的地层损失率应小于1%，相应管片脱出盾尾15 d以后不同盾构覆土厚度处的地面沉降槽最大沉降量 Δ 及盾构前方的最大隆起量 δ 不得大于表7中的规定数值。

表7 盾构掘进地面变形允许值

盾构顶部覆土深度 (m)	Δ (mm)	δ (mm)	备注
4	30	10	其他不同深度的 Δ 、 δ 值用内插法计算确定
8	19	6.3	
12	14	4.7	
16	11	3.7	
20	9	3	

7.6 盾构注浆控制

7.6.1 盾构法隧道穿越桥梁工程，应按施工组织设计要求进行同步注浆和二次补偿注浆。

7.6.2 盾构掘进与盾尾同步注浆须同时进行，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。

7.6.3 同步注浆控制应以注浆量和注浆压力双指标结合的方法，注浆前提为不得漏浆，若达到注浆压力未达到填充系数，可降低填充系数。填充系数应根据地层条件、施工状况和环境要求确定。

7.6.4 二次补强注浆宜在盾尾管片脱出后5~10环进行，且应根据现场变形监测数据进行多次补浆。

7.6.5 盾构注浆作业的浆液，应符合以下要求：

- 浆液应按设计配合比拌制；
- 浆液的相对密度、稠度、和易性、杂物最大粒径、凝结时间、凝结后强度、浆体固化收缩率均应满足工程要求；

——拌制后浆液应易于压浆，在运输过程中不得离析和沉淀。

8 监控量测

8.1 一般规定

8.1.1 工程监测方案应包括工程概况、场地条件及风险特点、监测目的和依据、监测项目、监测等级、测点布置、监测方法和精度、仪器设备和人员、监测频率及周期、监测控制值、监测数据管理、日常巡视内容及要求、监测工作计划、质量安全保证措施等。

8.1.2 盾构隧道穿越桥梁监测项目宜包括：桥墩水平和竖向位移、墩柱倾斜、结构裂缝，轨道（铁路和地铁既有线）静态几何变形，周边地表沉降，盾构管片结构竖向、盾构隧道水平位移及净空收敛，盾构管片结构应力，盾构隧道周围土体分层竖向位移，周边管线沉降等。可参照附录 B 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 监测等级应按照 GB 50911-2013 执行，一级环境风险工程应结合规范要求及相应安全评估报告编制专项监测方案。

8.1.4 穿越铁路、地铁既有线桥梁宜优先考虑高精度、多频次的远程自动化监测方法。

8.2 具体要求

8.2.1 桥梁结构竖向位移测点应布置在墩台或承台上；每个墩台和承台的监测点不应少于 1 个，群桩承台宜适当增加监测点。

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，测点应该按组布设在裂缝最宽处和首、末端，每组 2 个测点，设置于裂缝两侧且连线垂直于裂缝走向。

8.2.4 当采用人工监测时，监测频率按照表 8 执行，当采用自动化检测系统是，数据采集频率可采用 20~60 分钟/次。

表8 盾构隧道穿越桥梁监测频率

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 ^b
开挖面前方	周围岩土体、管线、桥梁	$5D < L \leq 8D^a$	1 次/2d
		$3D < L \leq 5D$	1 次/1d
		$L \leq 3D$	2 次/1d
开挖面后方	管片、周围岩土体、管线、桥梁	$L \leq 3D$	2 次/1d
		$3D < L \leq 8D$	1 次/1d
		$L > 8D$	1 次/2d
^a D—盾构开挖直径（m）			
^b 监测数据趋于稳定后，监测频率宜为 1 次（30d）；当发生预警或桥梁单位要求时，监测频率可适当加密。			

8.2.5 监测成果资料整理，应符合以下要求：

- 监测数据应真实、有效；
- 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。预警快报的主要内容应包括发生预警的项目、状态、时间、测点编号、监测数据、建议等；
- 应对已测数据根据日报、阶段报告要求及时进行处理，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；

- 当出现异常监测数据时，应对其原因及风险征兆进行及时分析和报告；
- 及时整理、汇总、分析沉降观测资料，按有关规定整理成册，报送有关单位进行沉降分析、评估；
- 应编制的监测报告主要包括日报、预警报告、阶段报告和总结报告。监测日报应在穿越工程监测周期内逐日报送当日监测情况；阶段报告可根据穿越工程进度、建设单位或运营单位要求的时间期限提交；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；总结报告应在穿越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、总结监测工作、给出监测结论。

附 录 A
(资料性附录)

盾构隧道穿越桥梁施工风险清单

盾构隧道穿越桥梁施工风险清单见表A.1。

表A.1 盾构隧道穿越桥梁施工风险清单

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	管片接缝渗漏水
		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	既有桥梁风险	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
		11	附属设施损害风险
U_3	盾构隧道与桥梁相互作用风险	12	近距离穿越叠加扰动风险
		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
		16	盾构施工对桥桩应力影响
		17	地质条件勘探不明风险
U_4	工程地质及周边环境风险	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
		23	地下水断流或污染
		U_5	施工监测风险
25	监控量测信息反馈滞后		
26	量测仪器损坏或精度不良		
27	应变措施和加固措施不当		
U_6	其他风险	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
(资料性附录)
盾构隧道穿越桥梁监测项目

盾构隧道穿越桥梁监测项目见表B.1。

表B.1 盾构隧道穿越桥梁监测项目

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	桥梁影响范围，每 20 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	每 5~10m 设一断面
	管片结构收敛	收敛计	
	地下管线	精密水准仪	沿管线 10m 一个
	桥墩水平变形	测量机器人	桥梁墩柱顶部
	桥墩竖向变形	静力水准仪	桥梁墩柱墩身
	桥墩倾斜	倾斜传感器	桥梁墩柱顶部
轨道沉降变形	晶硅式静力水准仪	沿高铁线路方向 5 m 一个	
选测项目	土体垂直位移	磁环分层沉降仪	每 30 m 设一断面，必要时需加密
	土体水平位移	测斜仪	每 30 m 设一断面，必要时需加密
	管片内力和变形	压力计和传感器	每 50~100 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	桥梁周边区域

附录 C
(资料性附录)
盾构小半径曲线掘进地表变形计算

C.1 盾构小半径曲线掘进力学模型

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 C.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 $yo z$ 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 。

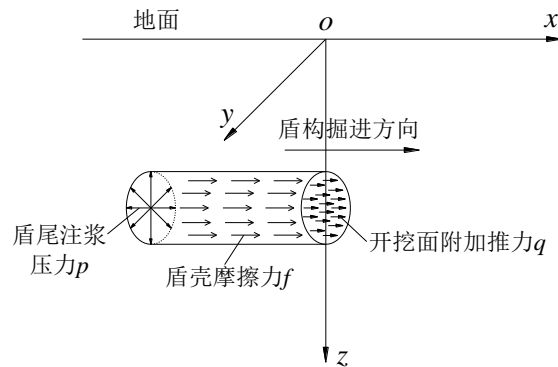


图 C.1 盾构小半径曲线掘进力学模型

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：

- (1) 土体不排水且为线弹性半无限空间。
- (2) 盾构推进仅考虑空间位置变化，不考虑时间效应。
- (3) 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 C.2(a)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。
- (4) 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 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 C.2(b)所示。
- (5) 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 f_1 、 f_2 ，且 $f_2 = \eta f_1 (\eta \leq 1)$ ， η 为盾壳摩擦系数差异系数，如图 C.2(b)所示。

(6) 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 1.2m，即 1 环管片宽度。

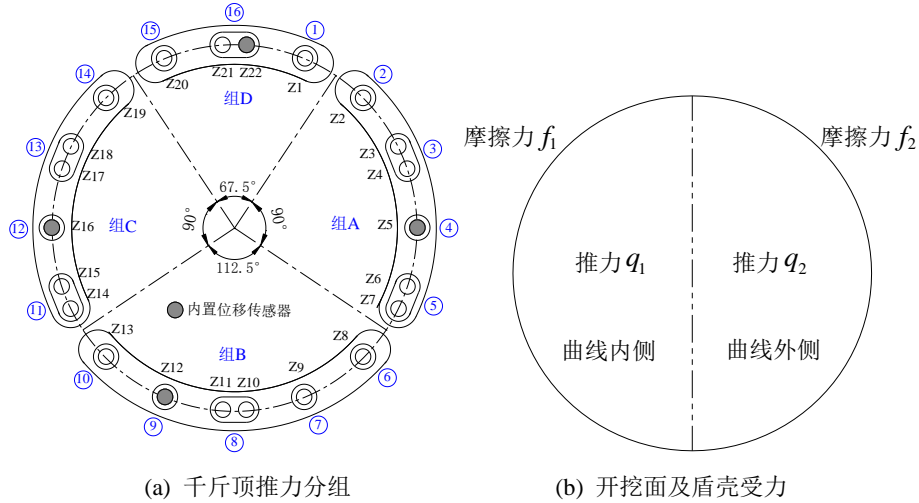


图 C. 2 曲线盾构受力分析

C. 2 开挖面附加推力引起的地表变形

对于盾构开挖面正面附加推力，其计算模型如图 C.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 ，对图中 Mindlin 解的 $x'y'z'$ 坐标系进行坐标系变换为

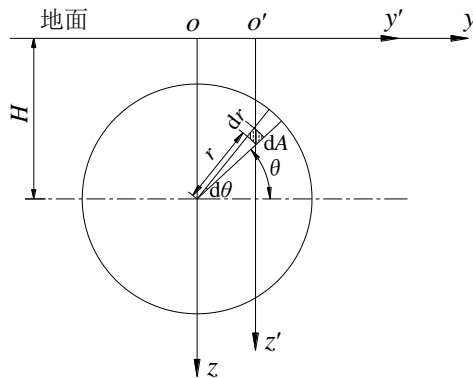


图 C. 3 开挖面附加推力引起地层变形的计算模型

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

根据曲线盾构线路左、右侧附加推力不等而分区积分，可得开挖面附加推力引起的地层变形 w_q 为

$$\begin{aligned} w_q &= \int_0^R \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} dw_2(q_2) + \int_0^R \int_{\frac{\pi}{2}}^{\frac{3\pi}{2}} dw_2(q_1) \\ &= \int_0^R \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{xq_1 r dr d\theta}{16\pi G(1-\mu)} \left\{ \xi \left[\frac{z-H+r\sin\theta}{R_1^3} + \frac{(3-4\mu)(z-H+r\sin\theta)}{R_2^3} - \frac{6z(H-r\sin\theta)(z+H-r\sin\theta)}{R_2^5} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{4(1-\mu)(1-2\mu)}{R_2(R_2+z+H-r\sin\theta)} \right] + \frac{z-H-r\sin\theta}{R_3^3} + \frac{(3-4\mu)(z-H-r\sin\theta)}{R_4^3} \right. \\ &\quad \left. - \frac{6z(H+r\sin\theta)(z+H+r\sin\theta)}{R_4^5} + \frac{4(1-\mu)(1-2\mu)}{R_4(R_4+z+H+r\sin\theta)} \right\} \dots\dots(C.2) \end{aligned}$$

其中，

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

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

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

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

C.3 盾壳摩擦力引起的地表变形

盾壳摩擦力引起的地层变形计算模型如图 C.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 $dP_h = fR d\theta ds$ ，进行坐标系变换为

$$\begin{cases} x' = x + s \\ y' = y - R \cos \theta \\ z' = z \\ a = H - R \sin \theta \end{cases} \dots\dots\dots(C.3)$$

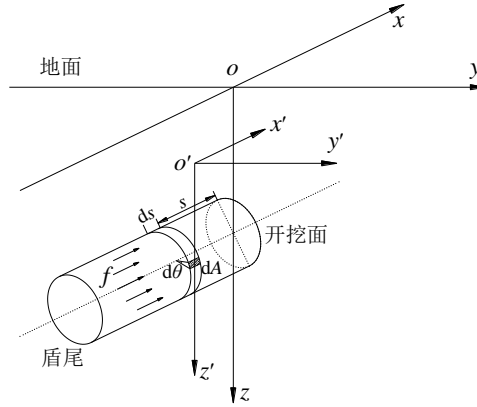


图 C.4 盾壳摩擦力引起地层变形的计算模型

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 为

$$\begin{aligned}
 w_f &= \int_0^L \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} dw_2(f_2) + \int_0^L \int_{\frac{\pi}{2}}^{\frac{3\pi}{2}} dw_2(f_1) \\
 &= \int_0^L \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{f_1 R d\theta ds (x+s)}{16\pi G(1-\mu)} \left\{ \eta \left[\frac{z-H+R\sin\theta}{R_1^3} + \frac{(3-4\mu)(z-H+R\sin\theta)}{R_2^3} \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. - \frac{6z(H-R\sin\theta)(z+H-R\sin\theta)}{R_2^5} + \frac{4(1-\mu)(1-2\mu)}{R_2(R_2+z+H-R\sin\theta)} \right] + \frac{z-H-R\sin\theta}{R_3^3} \right. \\
 &\quad \left. + \frac{(3-4\mu)(z-H-R\sin\theta)}{R_4^3} - \frac{6z(H+R\sin\theta)(z+H+R\sin\theta)}{R_4^5} + \frac{4(1-\mu)(1-2\mu)}{R_4(R_4+z+H+R\sin\theta)} \right\} \dots\dots\dots (C.4)
 \end{aligned}$$

其中，

$$\begin{aligned}
 R_{f1} &= \sqrt{(x+s)^2 + (y-R\cos\theta)^2 + (z-H+R\sin\theta)^2} \\
 R_{f2} &= \sqrt{(x+s)^2 + (y-R\cos\theta)^2 + (z+H-R\sin\theta)^2} \\
 R_{f3} &= \sqrt{(x+s)^2 + (y+R\cos\theta)^2 + (z-H-R\sin\theta)^2} \\
 R_{f4} &= \sqrt{(x+s)^2 + (y+R\cos\theta)^2 + (z+H+R\sin\theta)^2}
 \end{aligned}$$

C.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 为

$$\begin{aligned}
 w_p &= \int_0^s \int_0^{2\pi} \frac{pR\sin\theta ds d\theta}{16\pi G(1-\mu)} \left[\frac{3-4\mu}{R_1} + \frac{8(1-\mu)^2 - (3-4\mu)}{R_2} + \frac{(z-H+R\sin\theta)^2}{R_1^3} + \right. \\
 &\quad \left. \frac{(3-4\mu)(z+H-R\sin\theta)^2 - 2(H-R\sin\theta)z}{R_2^3} + \frac{6z(H-R\sin\theta)(z+H-R\sin\theta)^2}{R_2^5} \right] \dots\dots\dots (C.5)
 \end{aligned}$$

其中,

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

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

式中: S 为盾尾注浆段长度(m), 一般取 1 环管片宽度 1.2 m。

C.5 地层损失引起的地表变形

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 计算公式为

$$w_v = \frac{V_{loss}}{2\pi} \frac{H}{y'^2 + H^2} \left(1 - \frac{x+L}{\sqrt{(x+L)^2 + y'^2 + H^2}}\right) \dots\dots\dots(C.6)$$

式中: V_{loss} 为隧道单位长度的地层损失量(m^3/m)。

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 C.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(m), 则

$$V_{loss} = \pi R^2 - \pi R'^2 = \pi(Rg - \frac{g^2}{4}) \dots\dots\dots(C.7)$$

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 (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 为

$$g_c = g + \delta \dots\dots\dots(C.8)$$

将式(C.8)中的 g_c 替代式(C.7)中的 g , 可得到曲线盾构的地层损失量为

$$V_{loss} = \pi \left[R(g + \delta) - \frac{(g + \delta)^2}{4} \right] \dots\dots\dots(C.9)$$

根据盾构小半径曲线施工所需间隙的研究, 其线路内侧超挖量为

$$\delta = \frac{1}{2} \left[(R_c - R) - \sqrt{(R_c - R)^2 - L_1^2} \right] \dots\dots\dots(C.10)$$

式中: R_c 为曲线盾构线路的曲线半径(m); L_1 为单段盾壳长度(m), 考虑盾构机铰接装置的作用,

取 $L_1 = L/2$ 。

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 $y' = y + 0.5\delta$ ，得到曲线盾构施工地层损失引起的地表竖向位移 w_v 为

$$w_v = \frac{V_{loss}}{2\pi} \frac{H}{(y+0.5\delta)^2 + H^2} \left(1 - \frac{x+L}{\sqrt{(x+L)^2 + (y+0.5\delta)^2 + H^2}}\right) \dots\dots\dots (C.11)$$

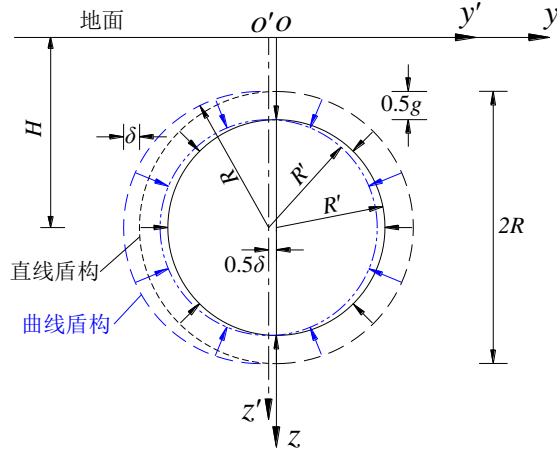


图 C.5 曲线盾构地层损失示意图

C.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 计算公式为

$$w = w_q + w_f + w_p + w_v \dots\dots\dots (C.12)$$

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 D
(资料性附录)
盾构掘进参数设计

D.1 盾构总推力

在盾构平稳掘进时，其总推力 F 为

$$\begin{aligned} F &= \alpha_F F_t \\ &= \alpha_F (F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_5 + F_6) \end{aligned} \dots\dots\dots (D. 1)$$

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 ，其具体计算公式如下：

对于黏性土地层， F_1 计算公式为

$$F_1 = \pi D_t L c \dots\dots\dots (D. 2)$$

式中： D_t ——盾壳外径；

L ——盾壳总长度；

c ——盾壳周围土体的黏聚力。

对于面板式盾构机， F_2 计算公式为

$$F_2 = \lambda \frac{\pi D_d^2}{4} p + (1 - \lambda) \frac{\pi D_d^2}{4} (p + p') \dots\dots\dots (D. 3)$$

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 计算公式为

$$F_3 = n_1 W_s \mu_s + \pi D_s b P_T n_2 \mu_s \dots\dots\dots (D. 4)$$

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；

D.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 为

$$\begin{aligned} T &= \alpha_T T_t \\ &= \alpha_T (T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + T_5 + T_6 + T_7 + T_8) \dots\dots\dots (D. 5) \end{aligned}$$

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，其具体计算公式如下：

T_1 计算公式为

$$T_1 = \frac{D_d^2}{8} \frac{v}{\omega} [p \tan^2(45^\circ + \frac{\varphi}{2}) + 2c \tan(45^\circ + \frac{\varphi}{2})] \dots\dots\dots (D. 6)$$

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 计算公式为

$$T_2 = \frac{\pi D_d^3}{12} K_0 f \gamma H (1 - \lambda) \dots\dots\dots (D. 7)$$

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 计算公式为

$$T_3 = \frac{\pi D_d^2}{4} B \gamma H \mu_d (1 + K_0) \dots\dots\dots (D. 8)$$

式中： B ——刀盘圆周的厚度；
 μ_d ——刀盘圆周与土体的摩擦系数。

D.3 同步注浆量

盾构掘进每环管片的注浆量 Q 为

$$\begin{aligned} Q &= \alpha_Q Q_t \\ &= \alpha_Q \frac{\pi(D_d^2 - D_s^2)}{4} l \dots\dots\dots (D. 9) \end{aligned}$$

式中： α_Q ——盾构施工同步注浆量的填充系数，通过每环管片的实际注浆量与每环管片的理论建筑空隙的比值得到；
 Q_t ——每环管片的理论注浆量，即每环管片的建筑空隙；
 l ——每环管片宽度。

D.4 掘进出土量

盾构掘进每环管片的出土量 U 为

$$U = \alpha_U U_t = \alpha_U \frac{\pi D_d^2 l}{4} \dots\dots\dots (D. 10)$$

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。

D.5 土仓压力

盾构掘进的土仓压力 P 为

$$P = \alpha_p P_t = \alpha_p K_0 \gamma H \dots\dots\dots (D. 11)$$

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~王府庄站区间黄河厚冲积黏性土盾构法施工为算例。盾构机为单圆土压平衡盾构机，盾壳总长度 $L=8.4\text{m}$ ，盾壳外径 $D_1=6.64\text{m}$ ，刀盘直径 $=6.68\text{m}$ ，管片外径 $D_s=6.4\text{m}$ ，每环管片宽度 $l=1.2\text{m}$ ；穿越地层平均黏聚力 $c=45\text{kPa}$ ，内摩擦角 $=23^\circ$ ，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 $=18.9\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ ；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 $=0.09$ ，土仓压力平均值 $p=91.4\text{kPa}$ ，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 $PT=0.38\text{MPa}$ ；平均掘进速度 $v=40\text{mm}/\text{min}$ ，平均刀盘转速 $=1\text{rpm}$ 。

注：代入该算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，进而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。

表 D.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	13287.79	8000~11000	0.677~0.753	9000~10000
刀盘扭矩/ kN·m	1587.17	1200~2300	0.882~1.260	1400~2000
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