

DB42

湖 北 省 地 方 标 准

DB42/T 2136—2023

盾构法输水隧道现浇钢筋混凝土二次衬砌 技术规程

Technical specification for cast-in-place reinforced concrete
secondary lining of shield water-conveyance tunnel

2023 - 11 - 29 发布

2024 - 03 - 29 实施

湖北省住房和城乡建设厅
湖北省市场监督管理局

联合发布

目 次

前言 III

引言 IV

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 2

4 基本规定 3

5 材料 3

 5.1 一般规定 3

 5.2 混凝土 3

 5.3 钢筋 4

 5.4 防水材料 4

 5.5 防腐蚀材料 5

6 设计 5

 6.1 一般规定 5

 6.2 荷载分类及组合 5

 6.3 结构设计 7

 6.4 防水设计 9

 6.5 防腐蚀设计 10

 6.6 抗冲磨设计 10

7 施工 11

 7.1 一般规定 11

 7.2 施工准备 11

 7.3 钢筋施工 12

 7.4 模板施工 13

 7.5 混凝土施工 14

 7.6 预应力施工 15

 7.7 防水施工 15

 7.8 防腐蚀施工 16

8 结构健康监测 16

 8.1 一般规定 16

 8.2 结构健康监测设计 16

 8.3 结构健康监测施工及验收 17

9 验收 18

 9.1 一般规定 18

 9.2 钢筋工程 18

DB42/T 2136—2023

0.3 模板工程	18
----------------	----

9.4 防水工程..... 19

9.5 预应力工程..... 19

9.6 混凝土工程..... 20

9.7 防腐蚀工程..... 20

9.8 功能性试验..... 21

条文说明..... 23

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。

本文件由湖北省住房和城乡建设厅提出并归口。

本文件起草单位：中建三局基础设施建设投资有限公司、中建三局集团有限公司、武汉市政工程设计研究院有限责任公司、中铁第四勘察设计院集团有限公司、中国地质大学（武汉）、中建商品混凝土有限公司、湖北省标准化与质量研究院、武汉市水务工程质量安全监督站。

本文件主要起草人：朱海军、戴小松、秦长金、贾瑞华、刘开扬、陈建斌、赵日照、陈伟、吴立鹏、鲁罕、孙文昊、谭飞、叶亦盛、陈俊伟、张鹏、徐术坤、毛升、譙理格、邵璇、余南山、张利勇、万世辉、苏长毅、张天宝、赵胜阳、鲁文博、彭文韬、刘康宇。

本文件实施应用中的疑问，可咨询湖北省住房和城乡建设厅，联系电话：027-68873088，邮箱：407483361@qq.com。在执行过程中如有意见和建议请邮寄中建三局基础设施建设投资有限公司（地址：武汉市东湖新技术开发区高新大道799号，邮编430075）。

引 言

盾构法隧道设置现浇钢筋混凝土二次衬砌主要适用于输水隧道、穿江越湖公路隧道等结构受力复杂或耐久性要求高的隧道。

盾构法输水隧道内设置现浇钢筋混凝土二次衬砌可以改善结构受力状态，提高工程耐久性，同时有利于介质传输。

为满足输水隧道对于结构耐久、结构运行安全的需要，保证盾构法输水隧道现浇钢筋混凝土二次衬砌设计及施工的质量，保障后续安全、经济地运营，特制定本文件。

本文件结合国内现阶段盾构法输水隧道现浇钢筋混凝土二次衬砌技术现状与实践经验，对盾构法输水隧道现浇钢筋混凝土二次衬砌的材料、设计、施工、结构健康监测和验收作出了规定。

盾构法输水隧道现浇钢筋混凝土二次衬砌技术规程

1 范围

本文件规定了盾构法输水隧道现浇钢筋混凝土二次衬砌的术语和定义、基本规定、材料、设计、施工、结构健康监测和验收。

本文件适用于采用现浇钢筋混凝土二次衬砌的盾构法输水隧道。

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/T 5224 预应力混凝土用钢绞线
- GB/T 14902 预拌混凝土
- GB/T 18736 高强高性能混凝土用矿物外加剂
- GB 50010 混凝土结构设计规范
- GB/T 50046 工业建筑防腐蚀设计标准
- GB 50108 地下工程防水技术规范
- GB 50119 混凝土外加剂应用技术规范
- GB 50194 建设工程施工现场供用电安全规范
- GB 50204 混凝土结构工程施工质量验收规范
- GB 50208 地下防水工程质量验收规范
- GB 50212 建筑防腐蚀工程施工规范
- GB 50268 给水排水管道工程施工及验收规范
- GB 50446 盾构法隧道施工及验收规范
- GB/T 50476 混凝土结构耐久性设计规范
- GB 50666 混凝土结构工程施工规范
- GB 50911 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
- GB 55001 工程结构通用规范
- GB 55030 建筑与市政工程防水通用规范
- JC/T 881 混凝土接缝用建筑密封胶
- JGJ/T 10 混凝土泵送施工技术规程
- JGJ 52 普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准
- JGJ 92 无粘结预应力混凝土结构技术规程
- JGJ/T 221 纤维混凝土应用技术规程
- JTG D60 公路桥涵设计通用规范
- SL/T 212 水工预应力锚固技术规范
- SL 279 水工隧洞设计规范

SL 352 水工混凝土试验规程

CECS 333 结构健康监测系统设计标准

T/CECS 765 结构健康监测工程施工及验收标准

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

输水隧道 water-conveyance tunnel

用于传输或存储水体的隧道，包括给水隧道、排水隧道和蓄水隧道。按隧道承受的内水压不同可分为有压输水隧道和无压输水隧道。

3.2

有压输水隧道 pressurized water-conveyance tunnel

洞内充满水流、洞壁周边均承受水压力作用的输水隧道。

[来源：SL 279-2016, 2.1.2, 有修改]

3.3

无压输水隧道 non-pressure water-conveyance tunnel

洞内部分充水、水流具有自由表面的输水隧道。

[来源：SL 279-2016, 2.1.3, 有修改]

3.4

现浇钢筋混凝土二次衬砌 cast-in-place reinforced concrete secondary lining

在管片衬砌内部设置的第二层衬砌结构，包含在现场浇筑的钢筋混凝土及预应力钢筋混凝土结构。

3.5

叠合式双层衬砌结构 superimposed double layer lining structure

二次衬砌直接浇筑到管片衬砌内部，二次衬砌形成后与管片衬砌形成叠合式结构，并以此实现双层衬砌共同分担其后作用的外部水土压力、内水压力等荷载，二次衬砌与管片衬砌之间可以传递轴力、剪力和弯矩。

3.6

复合式双层衬砌结构 combined double layer lining structure

由管片衬砌、界面结构、二次衬砌形成复合式结构，共同分担其后作用的外部水土压力、内水压力等荷载，界面结构为传力垫层，二次衬砌与管片衬砌之间可以传递轴力和弯矩，不能传递剪力。

3.7

抗冲磨 abrasion resistant

指抵抗水流对二次衬砌混凝土面的冲刷、磨损和空蚀破坏。

3.8

模筑法 moulding method

指立拱架支模板或利用模板台车修筑钢筋混凝土二次衬砌的一种方法。

3.9

螺栓手孔 bolt handhole

指管片结构上用于螺栓安装的预留孔。

3.10

结构健康监测 structural health monitoring

利用现场的、无损的、实时的方式采集结构的输入与输出信息，分析结构性能的波动、劣化或损伤特征，并为管理和养护提供决策支持的技术。

[来源：T/CECS 765-2020, 2.0.1]

4 基本规定

4.1 二次衬砌的材料、设计、施工和验收，应综合考虑工程用途、工程地质与水文地质条件、工程特点、材料性能、施工条件、工期要求和工程造价等因素，做到安全可靠、技术先进、经济合理和绿色环保。

4.2 二次衬砌的设计与施工应综合考虑服役环境、水质条件、使用年限等因素，施工宜采用机械化配套模筑法施工。

4.3 二次衬砌有结构健康监测要求时，应在设计阶段提出结构健康监测技术要求，相关设施宜与二次衬砌同期实施。

4.4 二次衬砌施工使用的材料、产品和服务，应符合国家现行有关标准、设计文件和施工方案的规定。**4.5** 二次衬砌施工应建立全面的施工管理体系，包括质量控制和检验制度，安全、劳动保护和环境保护措施。

4.6 二次衬砌工程的材料、设计、施工、结构健康监测及验收除应符合本规程外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

5 材料

5.1 一般规定

5.1.1 二次衬砌原材料、半成品和成品运至现场后，应按相关标准进行检验、验收。

5.1.2 二次衬砌材料应满足服役环境中相关耐久性要求，混凝土耐久性要求应根据结构设计使用年限进行确定。

5.2 混凝土

5.2.1 二次衬砌混凝土性能应满足以下要求：

- a) 混凝土应通过配合比优化设计试验，选择抗冲磨性、和易性、体积稳定性、耐久性和经济性较优的配合比，参与受力的二次衬砌混凝土强度等级不应低于 C35，预应力二次衬砌混凝土强度等级不宜低于 C40，混凝土水胶比宜小于 0.42；
- b) 混凝土应具有良好的耐久性能，电通量值应小于 1000C，抗冻等级不应低于 F300；
- c) 混凝土应采用防水混凝土，抗渗等级不应低于 P8，当结构有耐腐蚀要求时，应采用相应的耐腐蚀混凝土；
- d) 混凝土应具有良好的抗裂性能，宜采用补偿收缩混凝土，采用补偿收缩混凝土时按照 GB 50119 中补偿收缩混凝土的限制膨胀率测定方法测得 28d 限制膨胀率应大于 0.015%；
- e) 当二次衬砌厚度不大于 300 mm 时，宜采用自密实混凝土，采用自密实混凝土时应符合 JGJ/T 283 的规定，混凝土坍落扩展度性能等级不宜低于 SF2，间隙通过性等级不宜低于 PA2，抗离析性等级不宜低于 SR2；

- f) 当二次衬砌厚度不大于 200 mm 时,可加入纤维抵抗结构收缩和开裂,采用纤维混凝土时应符合 JGJ/T 221 的规定,纤维宜选用无机纤维类;
- g) 预应力筋的锚头应采用无收缩细石混凝土或水泥基聚合物砂浆封端。
- 5.2.2 用于配制二次衬砌混凝土的原材料除应符合 GB 50204 的规定外,还应符合下列要求:
- a) 应选用强度等级为 42.5 以上的普通硅酸盐水泥、中热硅酸盐水泥或硅酸盐水泥;
- b) 应选用符合 JGJ 52 中规定的中粗砂,采用天然砂时含泥量应不大于 3.0%,泥块含量应不大于 1.0%;
- c) 应选用符合 JGJ 52 中规定级配良好的天然或人工碎石,最大公称粒径不宜大于 25 mm,采用自密实混凝土、纤维混凝土时,最大公称粒径不宜大于 20 mm;含泥量应不大于 1.0%,泥块含量应不大于 0.5%;
- d) 应掺用高效减水剂,宜优先选用低收缩的高效减水剂,有抗冻要求的应论证加入引气剂的必要性;
- e) 应掺用 I、II 级粉煤灰,硅灰,磨细矿渣粉等活性掺和料;C50 及以上混凝土应选用 I 级粉煤灰,S95、S105 级矿粉,掺合料用量应通过优化试验确定,其品质应符合 GB/T 18736 的规定;
- f) 混凝土所用的骨料在使用前,宜采用浸水、洒水或加压预湿等措施进行预湿处理;
- g) 原材料应通过试验优选确定,选择性能稳定、生产厂家相对固定的产品。原材料变动时,应进行适应性试验。
- 5.2.3 二次衬砌混凝土拌合应符合以下规定:
- a) 混凝土应采用集中搅拌方式生产,生产过程应符合 GB/T 14902 的要求;
- b) 混凝土搅拌时间较普通混凝土的搅拌时间应延长 30 s 以上;
- c) 原材料的计量应按质量计,计量允许偏差应符合表 1 的规定。

表1 原材料计量允许偏差

单位为%

序号	原材料品种	胶凝材料	骨料	水	外加剂	掺合料
1	每盘计量允许偏差	±2	±3	±1	±1	±2
2	累计计量允许偏差	±1	±2	±1	±1	±1
注1:现场搅拌时原材料计量允许偏差应满足每盘计量允许偏差要求;						
注2:累计计量允许偏差是指每一运输车中各盘混凝土的每种材料计量称的偏差。该项指标仅适用于采用计算机控制计量的搅拌站。						

5.3 钢筋

5.3.1 二次衬砌受力钢筋应采用 HRB400 级及以上钢筋,钢筋强度标准值应具有不小于 95%的保证率。

5.3.2 二次衬砌设计为预应力结构时,预应力钢筋应采用钢绞线,制作无粘结预应力筋宜选用高强度低松弛预应力钢绞线,其性能应符合 GB/T 5224 的规定。

5.4 防水材料

5.4.1 复合式双层衬砌外衬管片与二次衬砌之间防水层应符合以下规定:

- a) 选用的土工布缓冲层材料应有良好的导水性、化学稳定性及耐久性,单位面积质量不宜小于 300 g/m²;

- b) 防水板应选用高分子防水板，可选用聚氯乙烯（PVC）、乙烯-醋酸乙烯共聚物（EVA）、乙烯-共聚酯沥青（ECB）、高密度聚乙烯（HDPE）、低密度聚乙烯类（LDPE）或其他性能相近的防水板。

5.4.2 二次衬砌内表面采用防水涂料时，应符合以下规定：

- a) 防水涂料应具有良好的耐水性、耐久性、耐腐蚀性及耐菌性，且无毒、难燃、低污染；
- b) 无机防水涂料应具有良好的潮湿基面粘结性、耐磨性；
- c) 有机防水涂料应具有较好的延伸性及较大适应基层变形能力。

5.4.3 二次衬砌接缝防水材料应符合以下规定：

- a) 橡胶止水带和钢边橡胶止水带不得采用再生橡胶，塑料止水带不得采用再生塑料；
- b) 对于高内水压、预计变形大的地段，施工缝、变形缝施工宜选用钢边橡胶止水带；
- c) 中埋式止水带应优先选用橡胶止水带或钢边橡胶止水带，遇有腐蚀性介质时宜选用氯丁橡胶止水带，橡胶止水带的防霉等级不应小于 2 级；
- d) 中埋式止水带的宽度应视内水压力大小、混凝土结构厚度等确定，宜控制在 300 mm～350 mm；
- e) 嵌缝材料应选用符合 JC/T 881 要求的聚硫或聚氨酯类建筑密封胶。

5.5 防腐蚀材料

5.5.1 二次衬砌内表面设置防腐材料时，材料基本技术指标应符合 GB 50212 的规定。

5.5.2 防腐蚀材料采用涂料时，涂料品种的选用、层数、厚度等应符合设计规定，可采用环氧类涂料、聚氨酯类涂料、丙烯酸树脂类涂料等。

6 设计

6.1 一般规定

6.1.1 盾构法输水隧道二次衬砌设计前应针对水文与地质条件、输水水质条件、与交叉建(构)筑物相互影响及施工条件进行调查分析。

6.1.2 新建盾构法输水隧道二次衬砌设计应与外衬管片统一考虑，协同设计，且应设计为全环闭合式。

6.1.3 二次衬砌结构应进行结构、防水、防腐蚀及抗冲磨设计。当二次衬砌用于防蚀、校正中心线偏离等时，可不进行结构计算。

6.1.4 二次衬砌材料选型及构造应有利于减轻内部水流的腐蚀与冲磨作用，且便于施工质量控制和使用阶段的检查维护。

6.1.5 二次衬砌结构的防腐蚀及抗冲磨设计应满足以下要求：

- a) 应根据不同隧道区段的体形特征与内水流速、流量、水流特性等因素进行设计；
- b) 当二次衬砌结构受内部水流多重腐蚀、冲磨因素共同作用时，设计应分别满足每种腐蚀或冲磨单独作用下的耐久性要求，并应综合考虑多重腐蚀、冲磨共同作用及不同防护措施相互影响。

6.1.6 二次衬砌结构的安全等级、设计使用年限等，应符合 GB 55001 的有关规定。

6.1.7 二次衬砌结构混凝土耐久性设计应符合 GB/T 50476 的有关规定。

6.2 荷载分类及组合

6.2.1 二次衬砌与外衬管片协同设计

二次衬砌与外衬管片协同设计时，荷载应按表2进行分类。

表2 盾构法输水隧道荷载分类

序号	荷载分类	荷载名称
1	永久荷载	结构自重
2		地层压力
3		隧道上部和破坏棱体范围的设施及建筑物压力
4		外水压力
5		界面水压力
6		内水压力
7		预应力
8		地层抗力
9	可变荷载	地面车辆荷载
10		施工荷载
11		水锤压力
12		冻胀力、膨胀力等
13	偶然荷载	地震作用
14		沉船、锚击

6.2.2 结构自重

结构自重应按结构实际重量计算。

6.2.3 地层压力

地层压力计算应满足以下要求：

- a) 垂直压力计算：
 - 1) 岩石地层按 SL 279 的规定计算；
 - 2) 土质地层，当覆土厚度 $\leq 2D$ （ D 为盾构隧道开挖外轮廓直径）时，按全土柱计算；当覆土厚度 $> 2D$ 时，按卸载拱效应下的全土柱计算。
- b) 侧向压力按静止侧压力计算。岩层、砂性土地层宜采用水土分算，黏性土地层宜采用水土合算。

6.2.4 隧道上部和破坏棱体范围的设施及建筑物压力

当隧道上部有既有和已批准待建的建筑物时，应根据结构物与隧道的相互关系确定荷载取值；当隧道覆土厚度足以形成卸载拱时，可按卸载拱理论考虑其作用力。

6.2.5 外水压力

外水压力应按最高、最低水位分别计算。当外水压力按水土合算时，外部水压力与土压力应合算为水平地层压力，不单独计算。

6.2.6 界面水压力

因外衬渗漏而产生的界面水压力，应按外水压力水头取值；因二次衬砌渗漏而产生的界面水压力，按内水压力水头取值。并应视工程条件和设计要求考虑是否需要折减。

6.2.7 内水压力

内水压力应按最不利的荷载组合取值。有压输水隧道内水压力按荷载组合要求取相应的隧道内水压计算；无压输水隧道内水压力按不利的自由水面计算。

6.2.8 预应力

预应力施加方式可按现SL 279的规定进行设置。预应力对二次衬砌产生的作用力，可按GB 50010和SL 279的有关规定计算。

6.2.9 地层抗力

可采用单向受压弹簧模拟，并应符合GB/T 51438的有关规定。

6.2.10 地面车辆荷载

应按隧道上方的汽车荷载或施工堆载最不利工况确定，可按JTG D60的有关规定计算。

6.2.11 施工荷载

施工荷载主要包含以下荷载及其最不利组合：

- a) 地面堆载；
- b) 相邻隧道施工相互影响；
- c) 二衬施工机械荷载；
- d) 注浆压力。

6.2.12 水锤压力

水锤压力应根据输水隧道闸阀开闭工况，通过水力计算确定。

6.2.13 冻胀力、膨胀力、地震荷载等按相关规范计算确定。

6.2.14 沉船、锚击等荷载应根据工程建设环境条件进行确定。

6.2.15 荷载（效应）组合

荷载（效应）组合应满足以下要求：

- a) 结构设计中，应根据施工、使用阶段在结构上可能同时出现的荷载，按承载能力极限状态和正常使用极限状态分别进行组合，并应取各自最不利的效应组合进行设计；
- b) 荷载效应组合应按施工期、运行期、检修期等各阶段可能出现的典型的设计工况和校核工况进行组合。

6.3 结构设计

6.3.1 盾构法输水隧道应根据服役环境、水质条件、工作特点等，并综合考虑施工技术条件，合理选用复合式双层衬砌结构、叠合式双层衬砌结构等结构形式。

6.3.2 双层衬砌结构采用复合式设计时，应以不影响结构受力为前提，在管片与二衬之间设置局部连接措施，防止二衬转动；采用叠合式设计时，应采取管片设置粗糙面、管片预留连接锚筋、螺栓手孔设置插筋等可靠的结构措施，确保外衬管片与二次衬砌结合为整体结构。

6.3.3 复合式和叠合式双层衬砌结构，在二次衬砌形成前，结构计算可采用梁-弹簧、修正惯用法等衬砌结构计算方法；二次衬砌形成后，按与外衬组成整体结构承担其后发生的全部荷载进行整体计算。可采用梁-弹簧模型，弹簧刚度可根据相关理论取值，也可根据试验进行取值。

6.3.4 二次衬砌计算时应综合考虑界面水压力、内水压力的影响，按最不利情况进行验算。

6.3.5 二次衬砌与外衬管片整体厚度不宜小于 400 mm，二次衬砌参与结构受力时，厚度不宜小于 200 mm。

6.3.6 二次衬砌结构变形缝应综合考虑结构形式、地质条件、施工工艺、温度变化、混凝土收缩等影响，缝宽与构造应能适应变形；对于饱和含水软弱土层、与始发或到达竖井相邻接隧道段或地层条件发生明显变化的区段，应加密变形缝。

6.3.7 二次衬砌受力钢筋保护层最小厚度、最小配筋率、钢筋的接头与钢筋的锚固均应执行 GB 50010 和 GB/T 50476 有关规定。

6.3.8 二次衬砌应有拱顶背后回填注浆设计，注浆管应结合施工缝和变形缝设置。

6.3.9 当隧道承受内水压力较高或结构对裂缝宽度有较高要求时，二次衬砌宜采用后张预应力混凝土结构，通过张拉预埋于二次衬砌中的预应力筋提供预应力，可根据结构工作条件选用无台座张拉的环锚预应力体系。

6.3.10 二次衬砌结构计算应满足以下要求：

- a) 应采用极限状态设计方法，以分项系数的设计表达式按照承载能力极限状态、正常使用极限状态，对施工、运行和检修各阶段进行结构计算和验算；
- b) 二次衬砌结构应与外衬结构组成整体结构进行抗滑、抗倾、抗浮稳定等整体结构计算；
- c) 二次衬砌结构计算应按荷载结构模型采用结构力学法进行，以横向结构计算为主。对于荷载沿隧道纵向有变化、地质条件复杂的隧道，与其它建筑物交叉、小净距并行隧道、抗震设防烈度为 7 度及以上的隧道等应采用地层结构模型进行纵向结构计算。横向结构计算应包括：截面内力、截面变形、结构强度、结构裂缝等。纵向结构计算应包括：纵向内力、隧道纵向变形、结构强度、结构裂缝等；
- d) 二次衬砌形成前，外衬结构计算应满足施工期单独受力需要；二次衬砌形成后，按与外衬组成整体结构承担其后发生的全部内外荷载进行分析计算；
- e) 二次衬砌结构的计算与设计方法参照 GB 50010、GB/T 51438 的规定进行。

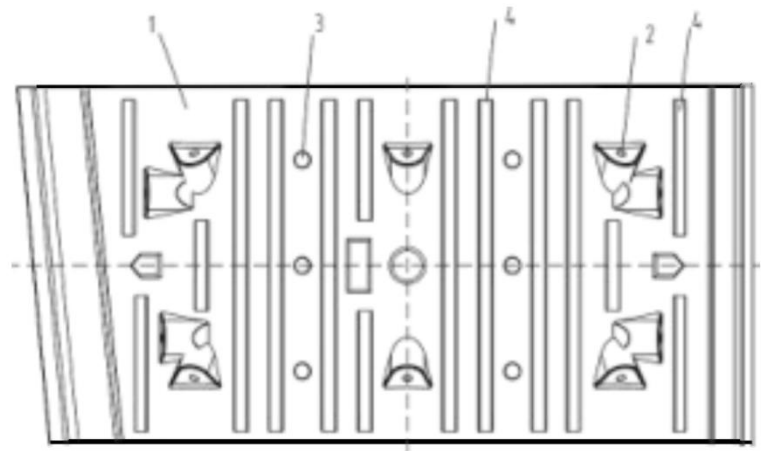
6.3.11 二次衬砌应进行结构抗震设计，可参照 GB/T 51438 的规定执行。

6.3.12 环锚预应力体系设计应满足以下要求：

- a) 环形锚索式预应力混凝土衬砌，应将锚索施加的环向应力作为荷载之一，按弹性理论进行结构应力分析，可通过有限元计算或模型试验复核；
- b) 环形预应力锚索的设计张拉力，应满足需要环形锚索提供的径向预压应力要求，并考虑锚索张拉过程中的摩擦损失；
- c) 锚具槽的布置应以便于施工为原则，左右两侧宜交错布置；
- d) 环锚预应力体系设计可参照 SL/T 212 的规定执行。

6.3.13 叠合式双层衬砌结构应采取如下构造措施，以确保二次衬砌与外衬管片结合为整体结构：

- a) 外衬管片与二次衬砌叠合面应设置为粗糙面，粗糙面面积不宜小于总接触面积的 75%，叠合面可在管片预制时设置凹槽，凹槽如图 1 所示，凹槽深度不宜小于 4 mm；
- b) 若预制时设置凹槽存在困难，可在出厂前对管片进行凿毛处理。凿毛应在管片混凝土终凝 24 小时之后开始，凿毛深度不宜小于 4 mm；



标引序号说明：
1—外衬管片；
2—螺栓手孔；
3—钢筋接驳器连接套筒；
4—管片内弧面凹槽。

图1 管片内弧面凹槽设置示意图

- c) 外衬管片与二次衬砌连接锚筋长度应满足锚固要求，预埋在管片内的部分可采用带有内螺纹的钢筋接驳器；
 - d) 当在管片螺栓手孔内布置插筋与二次衬砌进行连接时，连接插筋宜与管片螺栓垫片进行有效连接；
 - e) 外衬管片螺栓手孔、接驳器、螺栓孔等部位应设置构造加强钢筋。
- 6.3.14 复合式双层衬砌结构应采取以下构造措施：
- a) 二次衬砌与外衬管片的界面敷设弹性排水垫层，必要时垫层外侧增配防水膜。垫层应做到表面平顺、平整、牢固、无气囊、无破损、不鼓包、不下垂、接长不留空隙；
 - b) 地下水丰富的区域宜配套完善的排放界面渗漏水措施，包括：
 - 1) 在二次衬砌底部混凝土中埋设纵向排水总管，汇集和统一排放界面渗漏水；
 - 2) 在界面敷设的弹性垫层应能够将所收集到的渗漏水就近顺畅汇入排水总管；
 - 3) 当采用机械排放渗漏水时，不宜与排空隧道积水共用同一套设备排放。

6.4 防水设计

- 6.4.1 防水设计应根据环境条件、环境作用等级、设计使用年限、结构特点、施工方法等因素进行，以满足结构安全、耐久性、环境保护和使用要求。
- 6.4.2 二次衬砌应以结构自防水为主，接缝防水为重点，以限制裂缝宽度的原则设计，并宜考虑内水外渗对外衬受力造成的不利影响。
- 6.4.3 二次衬砌抗裂设计时裂缝宽度不得大于 0.2mm，并不得贯通。当传输介质具有腐蚀性或面对更严苛环境条件时，裂缝控制要求可根据 GB/T 50476 及其他相关标准的规定进行加强。
- 6.4.4 二次衬砌施工缝、变形缝防水设计应满足以下要求：
- a) 施工缝防水措施应不少于 2 种，防水措施可采用外贴式止水带、中埋式止水带、遇水膨胀止水条或止水胶、预埋注浆管、混凝土界面处理剂等；

- b) 变形缝宜首选中埋式止水带，其次可选外贴式止水带，粘贴式或可卸式等内装式止水带；

- c) 二次衬砌厚度不大于 300 mm 时,可优先采用内装可卸式止水带设计。

6.4.5 防水设计应符合 GB 50108 和 GB 55030 的有关规定。

6.5 防腐蚀设计

6.5.1 二次衬砌结构的防腐蚀设计应根据混凝土结构设计使用年限,通过提高混凝土结构自身耐久性,辅以附加防腐蚀措施,并进行施工质量控制及使用期检测维护来满足盾构法输水隧道现浇钢筋混凝土二次衬砌结构的防腐蚀设计要求。

6.5.2 二次衬砌结构防腐设计应根据结构的设计使用年限、内部水流类别及作用等级、结构重要性,并考虑施工条件、维护便利性及全寿命成本等因素进行合理设计。

6.5.3 二次衬砌结构防腐设计前应进行专门的腐蚀环境调查,调查的内容应包括拟输水水体 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 H_2S 等离子含量、微生物浓度或存在的其他侵蚀介质, pH 值、电阻率等。

6.5.4 针对不同的输水水体成分,防腐蚀设计应符合下列规定:

- a) 含氯离子水体应针对氯离子在混凝土内渗透导致的钢筋腐蚀;
- b) 含化学腐蚀离子水体应针对混凝土遭受化学腐蚀性物质侵蚀引起的损伤;
- c) 含微生物水体应针对微生物代谢中间产物或终产物对混凝土侵蚀引起的损伤。

6.5.5 二次衬砌结构的防腐蚀设计应包括以下内容:

- a) 结构或构件的设计使用年限、侵蚀性介质类别及环境类别;
- b) 有利于减轻或抵抗环境作用的结构和构件形式,可修复性说明;
- c) 混凝土保护层厚度、裂缝控制要求等;
- d) 混凝土性能要求,包括强度等级、抗氯离子渗透性、抗硫酸盐侵蚀等级、抗渗等级、抗硫化物侵蚀等级、拌合物氯离子含量和含气量等指标;
- e) 混凝土原材料质量及配合比要求,包括水泥和掺合料等胶凝材料、骨料、拌合水和外加剂等质量及配比要求,规定水胶比、胶凝材料用量限值等;
- f) 附加防腐蚀措施及设计防护年限等;
- g) 试用阶段监测维护要求和建议等。

6.5.6 二次衬砌结构的防腐蚀技术措施应包括本体措施和附加措施两方面,相关技术措施可参照 GB/T 50046 的有关规定。

6.5.7 二次衬砌结构防腐设计的施工质量控制及抗裂措施应按照现行国家相关规范标准执行。

6.6 抗冲磨设计

6.6.1 二次衬砌结构抗冲磨设计应做好拟传输水体中固体颗粒的体积含量、颗粒形状、粒径、硬度、矿物成分、异重流运动规律等信息的收集,推移质多的水体应收集推移质的数量、粒径及其运动方式,并分析其对混凝土表面的冲磨影响。

6.6.2 高流速、水流条件复杂的隧道应开展整体或局部的水工模型试验,使形体简单合理、水流平稳。

6.6.3 在较易发生水流冲蚀的区域,二次衬砌结构表面设置抗冲磨护面材料时,护面材料可采用环氧树脂砂浆、聚合物纤维砂浆、不饱和聚酯树脂砂浆、丙烯酸树脂砂浆、聚氨酯砂浆等,其与二次衬砌结构间的界面粘结力不得小于 1.5 MPa,线膨胀系数之比应小于 4。

6.6.4 在较易发生水流冲蚀的区域,未设置护面材料的二次衬砌结构可采取以下措施提升抗冲磨性能:

- a) 二次衬砌混凝土采用纤维混凝土;
- b) 提高二次衬砌混凝土的冲磨韧性,严格控制抗冲磨损率和收缩率,抗冲磨损率不宜大于 5%,收缩率不宜大于 400×10^{-6} ;

- c) 二次衬砌水流冲刷面的钢筋保护层厚度不小于 5 cm，且采取平行水流的方向布筋。
- 6.6.5 二次衬砌结构用混凝土应通过 SL 352 进行配合比优化设计和抗冲磨强度优选试验。

7 施工

7.1 一般规定

- 7.1.1 二次衬砌应在外衬管片变形稳定后施作。
- a) 外衬管片结构变形稳定指标应采用变化速率与累计值双控，当无地方经验时，可按表 3 确定；

表3 外衬管片结构变形稳定指标

变形稳定控制项		变化速率控制值 mm/d	累计值控制值 mm
管片结构沉降	坚硬～中硬土	1	10～20
	中软～软弱土	1	20～30
管片结构上浮		1	30
管片结构差异沉降		—	0.04% L_s
管片结构净空收敛		1	0.2%D
注： L_s ——沿隧道轴向两监测点间距，D——隧道开挖直径，d——天。			

- b) 二次衬砌施工前应完成施工区域管片结构的隐蔽验收，验收合格后才可开始二次衬砌作业；
- c) 外衬管片结构隐蔽验收参照 GB 50446 成型隧道验收的要求进行。
- 7.1.2 二次衬砌专项施工方案，除了包含专项施工方案编制规定中要求的内容，还应包含以下内容：
- a) 工作井及隧道内临时设施设计；
- b) 模板体系设计；
- c) 隧道风、水、电供应设计；
- d) 钢筋及混凝土水平运输方法；
- e) 外衬管片基面处理措施。
- 7.1.3 二次衬砌模筑法施工工艺应结合隧道断面大小、隧道长度、工期要求等选取。采用仰拱先行时，仰拱应先行不大于 2 个拱墙浇筑循环长度。隧道断面较小时，可采用全圆针梁式台车或穿行式台车一次成型。
- 7.1.4 二次衬砌施工过程中应做好外衬管片及成型二次衬砌的成品保护。
- 7.1.5 二次衬砌应设置首件样板，首件工程验收通过后方可开展大面积施工。

7.2 施工准备

- 7.2.1 场地布置应满足以下要求：
- a) 二次衬砌施工场地应与盾构施工场地布置统一规划，减少重复调整；
- b) 二次衬砌施工工作井底布置应综合考虑二衬施工水平运输错车的需求，合理布置道岔或平移设备；
- c) 二次衬砌施工工作井及隧道应合理规划人员通行通道，轨行区应有防护措施及警示措施。
- 7.2.2 二次衬砌施工测量应符合以下规定：
- a) 二次衬砌施工前，应对工作井内的测量控制点进行复核，对于已破坏控制点进行加设；

- b) 二次衬砌洞内施工的水准点，应根据洞外、洞内已设定的水准点，按施工需要进行加设；
- c) 二次衬砌施工前，应复核成型管片外衬中线位置和高程，确保衬砌施工后的衬砌厚度和净空满足规范 and 设计要求；
- d) 二次衬砌施工用的临时中线点的间距宜与模板长度一致。

7.2.3 施工材料应符合以下规定：

- a) 二次衬砌混凝土应完成配合比设计，相关原材送检工作已完成；
- b) 二次衬砌钢筋应采取防锈蚀措施；
- c) 二次衬砌需特殊加工的防水材料加工进度应满足要求，并应完成试验检测工作。

7.2.4 施工设备应符合以下规定：

- a) 二次衬砌施工应选用污染小、噪声小的机械设备，优先采用清洁能源；
- b) 二次衬砌施工设备应与施工工艺相配套，与工作井尺寸、隧道断面、施工工期相适应；
- c) 二次衬砌衬砌台车等特制设备应进场完成调试或具备进场条件。

7.2.5 风、水、电供应应符合以下规定：

- a) 风、水、电的设计应满足作业面施工的需要，并有一定的富余度；
- b) 通风设计应根据隧道长度、断面大小、工作井深度、施工方法等综合确定；二次衬砌与盾构同步施工时，通风设计应与盾构施工同步设计；盾构贯通后二衬施工时，应结合隧道内有害气体浓度情况制定通风措施，必要时应增设固定式有害气体监测及报警装置；当工作井深度较大时，应设置垂直通风措施；
- c) 供电设计应根据隧道长度、断面大小、用电负荷等综合确定。低压供电线路长于 300m 时，应计算电压降的影响，可结合隧道长度、隧道直径选用合适的低压补偿、稳压措施；
- d) 供电设计应按动力、照明分路供电，并应设置应急电源；
- e) 风、水、电管路敷设应牢固、平顺，且不妨碍隧道内水平运输；
- f) 风、水、电管路敷设应减少在成型二次衬砌上打孔、开槽等作业；
- g) 施工期间，风、水、电管路应设置专人负责定期检查、维护；
- h) 钢筋施工、模板台车前移过程中应对电缆等供电线路做好保护；
- i) 供电设计与施工应符合现行 GB 50194 的规定。

7.2.6 外衬管片基面应符合以下规定：

- a) 外衬管片应清洁、干燥，不得有污泥、积水、垃圾等；
- b) 外衬管片应提前进行渗漏封堵处理，满足设计防水等级规定；
- c) 外衬管片螺栓应全部拧紧，不得欠拧，螺栓不得缺漏；
- d) 外衬破损管片应完成修补。

7.2.7 叠合式双层衬砌结构外衬管片基面尚应符合以下规定：

- a) 外衬管片内弧面应保持粗糙面，面积符合设计规定；
- b) 外衬管片设置有钢筋接驳器时，应进行全数清理及试连接。

7.2.8 复合式双层衬砌结构外衬管片基面尚应符合以下规定：

- a) 外衬管片螺栓孔、吊装孔应完成封堵；
- b) 外衬管片拼装缝应完成嵌缝。

7.3 钢筋施工

7.3.1 钢筋原材表面的油渍、水泥浆和铁锈等均应清除干净。

7.3.2 钢筋加工应符合以下规定：

- a) 钢筋应在隧道外集中加工，保证弧形加工精度；
 - b) 环向钢筋应结合隧道断面在外进行机械预弯弧，一次弯弧到位；
 - c) 环向钢筋应结合钢筋运输设备、钢筋加工及安装的可操作性合理分段，搭接长度应满足规范及设计要求；
 - d) 加工成型钢筋应分环向钢筋、纵向钢筋、箍筋等类别有序堆放并标识；
 - e) 已检验合格的钢筋螺纹头应戴上保护帽，保护帽在存放及运输装卸过程中不得取下。
- 7.3.3 钢筋运输应符合以下规定：
- a) 钢筋长距离运输时，宜采用机械化运输方式；
 - b) 钢筋运输时应做好钢筋半成品的保护工作，并对不同类别的钢筋进行明显标识并分开摆放；
 - c) 钢筋运输至洞内后摆放时应采取下垫措施，避免直接摆放于外衬管片底部。
- 7.3.4 钢筋连接与安装应符合以下规定：
- a) 二次衬砌设置双层及以上钢筋时，钢筋接头应分散布置，有压输水隧道二次衬砌内层钢筋接头统一按受拉区处理；
 - b) 隧道直径较小或区间距离较长时，钢筋连接不宜采用焊接方式。如须采用焊接作业时，应做好强制通风措施，并对隧道内空气质量进行实时监测；
 - c) 钢筋安装过程中应采取定位及防变形措施；
 - d) 钢筋安装时，同一根环向受力筋应置于同一竖直面，并垂直于隧道轴线，环向受力筋应与纵向筋垂直；
 - e) 叠合式双层衬砌二次衬砌钢筋应按设计要求与外衬管片上预埋的钢筋接驳器、管片螺栓等有效连接；
 - f) 受力筋与模板之间、受力筋与防水层之间应安装满足设计厚度及间距要求的垫块；
 - g) 二次衬砌钢筋连接及安装应设置稳定可靠的作业平台，可设置中间可穿行式钢筋作业台车。

7.4 模板施工

- 7.4.1 模板体系设计应符合以下规定：
- a) 模板体系的选用应结合隧道断面、区间长度、施工部署、材料及机械供应进行确定，优先采用模板台车进行施工；
 - b) 模板台车及拼装式模板支架应进行设计、验算，应满足混凝土浇筑过程中的强度、刚度和稳定性要求；
 - c) 模板体系设计应计算泵送混凝土荷载和辅助振捣荷载，并确保模板台车在拆卸、移动、安装等施工条件下不变形；
 - d) 挡头模板应与衬砌断面相适应，方便止水带安装，采用台车时应采用可重复使用并能同时固定止水带的定型模板；
 - e) 采用拼装式模板时，单块活动模板长度宜为 1000 mm，最大不应超过 1500 mm，宽度不宜大于 500mm。
- 7.4.2 二次衬砌采用模板台车进行施工时，应符合以下规定：
- a) 模板台车单节长度应根据隧道曲率大小、混凝土供应能力、衬砌厚度等进行确定；
 - b) 隧道曲率较大时，模板台车长度设计应注意台车过弯侵限问题，可采用减小台车长度或者台车分节铰接连接的措施；
 - c) 模板台车应有可靠的导向装置（如轨道、针梁等），行走方式宜设计为自行式，配置自动行走装置和固定装置；

DB42/T 2136—2023

- d) 采用门架式模板台车时，行走方式宜设计为轨行式，配置行走轮及行走轨道；

- e) 采用门架式模板台车时，应满足中间人员及材料安全通行的要求，可采用可穿行式设计；
- f) 仰拱模板台车及全圆式模板台车设计时，应进行抗浮设计；
- g) 模板台车设计应合理留置振捣窗、观察窗、浇筑孔（注浆孔）、排气孔（溢浆孔）。

7.4.3 模板体系制作及安装应符合以下规定：

- a) 模板台车投入使用前，应进行预拼装验收，验收通过后方可使用；
- b) 模板台车吊装入工作井过程中，应有防止勒伤模板、台车变形及与竖井结构碰撞的措施；
- c) 模板台车定位时，先定高程，后定中线，确保台车中心线和高程与设计隧洞中线高程吻合。
- d) 模板体系应与已浇筑完成的二次衬砌搭接，宽度不宜小于 80 mm；
- e) 模板体系重复使用时，循环使用前应进行检查，出现异常应予以修整，模板面应进行清理并刷涂脱模剂，脱模剂刷涂应全面彻底，模板面清理时避免损伤模板面；
- f) 模板就位后，应对模板背后净空是否满足衬砌厚度要求进行检查，固定在模板上的预埋件、预留孔和预留洞，应检查其数量和尺寸；
- g) 挡头模板安装应固定牢靠，封堵严密，不得损坏止水带安装；
- h) 模板体系安装到位后，应进行位置测量，验收满足要求后方可进行混凝土浇筑。

7.4.4 模板体系拆除及维护应符合以下规定：

- a) 混凝土拆模时的强度应符合设计要求。当设计未提出要求时，宜在同条件养护试块强度达到 10 MPa 以上，方可拆除；
- b) 模板体系拆除后应及时移位并进行维护。

7.5 混凝土施工

7.5.1 混凝土运输设备和浇筑设备，应与运输条件、混凝土级配、拌和能力、运输能力、浇筑强度、混凝土温度控制要求、仓面具体情况等相适应。

7.5.2 混凝土输送应符合以下规定：

- a) 混凝土运输应采取保证连续供应的措施，并应满足现场施工的需要；
- b) 混凝土水平运输方式应根据隧道断面、隧道长度、施工部署、混凝土性能、工作井情况综合选取，可采用一泵到底、设置中转站接力泵送、皮带运输及混凝土运输罐车等运输方式或几种方式相结合的接力运输方式；
- c) 二次衬砌混凝土需进行长距离水平泵送时，应满足 JGJ/T 10 的要求，混凝土性能应经泵送试验验证。若采用水平泵送，一次泵送距离不宜超过 500 m；
- d) 混凝土采用泵送时，应在泵送前泵送砂浆进行润滑，砂浆泵出后应妥善回收；
- e) 混凝土需从工作井进行垂直向下运输，超出天泵工作深度时应配置溜槽或溜管，溜槽或溜管底部应设置足量的弯头或水平配管；
- f) 混凝土采用罐车进行运输时，罐车大小应与隧道断面大小相适应，工作井或隧道内宜有辅助倒车或错车的措施。

7.5.3 混凝土浇筑应符合以下规定：

- a) 二次衬砌混凝土浇筑应分仓进行，单仓长度根据模板体系设计决定；
- b) 二次衬砌混凝土浇筑方法应与区间长度、工期要求、模板体系设计相适应；
- c) 二次衬砌混凝土浇筑应连续，当出现间歇浇筑时，其间歇时间宜尽量缩短，并应在前层混凝土初凝之前，将次层混凝土浇筑完毕；
- d) 二次衬砌混凝土浇筑采用泵送方式时，宜采用后退拆管式由远及近浇筑；

- e) 二次衬砌混凝土浇筑厚度应满足设计要求，可结合拱顶模板观察口、溢浆孔对浇筑情况进行检查，厚度达到设计要求后方可结束浇筑；
- f) 二次衬砌采用模板台车施工时，台车宜配备带模注浆系统，并在混凝土浇筑完毕后利用带模注浆系统对拱顶进行跟踪注浆，确保拱顶密实；
- g) 二次衬砌混凝土浇筑应由下向上对称浇筑，两侧同时或交替进行，混凝土出料口与混凝土灌注面高差不宜大于 2.0 m。

7.5.4 混凝土养护应符合以下规定：

- a) 二次衬砌混凝土养护应在拆模后立即进行，保湿养护应不少于 14 天；
- b) 在已浇筑的混凝土强度未达到 10 MPa 以前，不得在其上踩踏或铺设轨道。

7.5.5 二衬背后回填注浆应符合以下规定：

- a) 注浆应采用高强无收缩材料；
- b) 回填注浆应在二次衬砌强度达到设计强度的 80% 后方可施作，范围应在顶部中心角 $90^{\circ} \sim 120^{\circ}$ ，注浆压力根据二次衬砌厚度、注浆范围、注浆工艺等确定，不宜大于 0.4 MPa。

7.6 预应力施工

7.6.1 二次衬砌结构施加预应力前，结构强度等级应不低于设计要求。设计无要求时，混凝土强度不应低于设计强度等级值的 80%，弹性模量不低于混凝土 28 d 弹性模量的 80%。

7.6.2 二次衬砌采用后张有粘结预应力筋时，应对预应力筋孔道采取线形控制、接头防漏、防堵、内壁清理等措施。

7.6.3 二次衬砌采用后张无粘结预应力筋时，应按现行 JGJ 92 的规定对外包层材料及防腐油脂性能进行检测。

7.6.4 二次衬砌后张预应力筋施工应满足以下规定：

- a) 预应力器材进场后，应由有资质的检测单位对张拉机具的拉力与油压计量设备进行复核率定，对预应力筋抽样进行原材物理力学性能测试，并将预应力筋与锚具的组装件进行静载锚固性能试验；
- b) 预留槽尺寸应满足张拉机具对锚具组装件的张拉要求；
- c) 预应力筋安装前，应对预留槽周壁及底板凿毛；
- d) 预应力筋整束张拉前，应对其中的每根预应力筋逐根预紧，单根预紧力不应超过控制张拉力的 25%；
- e) 张拉应分步分级张拉，相邻 2 道锚索所受拉应力差值不大于设计张拉力的 50%；
- f) 张拉控制应采用双控，同时对张拉应力及伸长量进行控制；
- g) 每次张拉结束后，应仔细查看二衬混凝土有无裂缝，尤其注意预留槽端壁和周围，并做好记录，若出现异常情况，须及时妥善处理，方可进行下一序次的张拉。

7.6.5 预应力筋张拉完毕应尽快对孔道进行回填灌浆，灌浆应采用无收缩水泥砂浆或水泥浆。

7.6.6 预留槽回填混凝土的强度等级应不低于二衬混凝土强度等级，并宜采用微膨胀混凝土。

7.6.7 预应力施工应符合 GB 50666 的规定，环锚预应力施工可参照 SL/T 212 的规定执行。

7.7 防水施工

7.7.1 二次衬砌采用的防水混凝土、防水涂料、橡胶止水带等材料特性应符合 GB 50108、GB 50208 的规定。

7.7.2 二次衬砌背后防水层施工应在基面施工完成后，钢筋施工前完成，且超前钢筋施工 2 个初砌长

度。

7.7.3 复合式双层衬砌结构二次衬砌背后防水层施工应满足以下要求：

- a) 排水（盲）管的材质、强度、透水性应符合设计要求，盲管不得有凹瘪、扭曲；
- b) 环向排水盲管、竖向排水盲管应紧贴初期支护表面敷设，布置间距应满足设计要求，应在有集中渗水位置敷设，在地下水较大地段应加密；
- c) 纵向排水盲管敷设的纵向坡度应与隧道纵坡一致，不得起伏不平；
- d) 防水层施工应设置稳定可靠的作业平台，可设置专用台车铺设；
- e) 防水层应环向整幅铺设；
- f) 防水板铺挂时应适当松弛，松弛系数根据断面大小、排水（盲）管设置情况确定；
- g) 防水卷材铺设好后，应注意卷材的保护。

7.7.4 施工缝、变形缝防水施工应符合下列规定：

- a) 水平及环向施工缝接缝面应凿毛，涂刷混凝土界面剂、水泥基渗透结晶型防水涂料等；
- b) 中埋式止水带中间空心圆应顺施工缝、变形缝方向并与缝重合安装；
- c) 止水带接头应连接严密，宜采用热硫化连接，“十字”型、“丁”字型接头可根据施工要求事先向厂家定制，不得在止水带上穿钉、打孔；
- d) 止水带应保持清洁，后浇一侧混凝土浇筑前应对接缝处止水带上的残渣、浮浆进行清理。

7.8 防腐蚀施工

7.8.1 二次衬砌内表面防腐蚀涂层施工时，施工环境温度、衬砌内表面湿度、粗糙度、平整度应满足涂料施工的要求。

7.8.2 防腐蚀涂层应分层刷涂或喷涂，涂层应均匀，不得漏刷漏涂；每遍涂刷时应交替改变涂层的涂刷方向，厚度、接搓宽度满足设计要求。

7.8.3 防腐蚀涂层施工过程中，应采取强制通风措施。

7.8.4 防腐蚀施工应符合现行 GB 50212 的规定。

8 结构健康监测

8.1 一般规定

8.1.1 二次衬砌结构健康监测应满足在设计使用年限内掌握隧道结构安全状态的要求。

8.1.2 二次衬砌结构健康监测系统的硬件和软件应遵循稳定可靠、经济适用、技术先进、操作方便的基本原则。

8.1.3 二次衬砌结构健康监测系统应具有采集、传输、存储、数据处理、预警与安全状态评估等功能。

8.1.4 二次衬砌结构健康监测系统应在二次衬砌施工过程中做好预留预埋。

8.2 结构健康监测设计

8.2.1 二次衬砌结构健康监测设计前应进行风险源识别，风险源识别的对象应包含：隧道所处地质与环境条件、隧道结构形式、毗邻建（构）筑物、运营过程以及突发事件等因素。

8.2.2 二次衬砌结构健康监测项目应以风险源识别为基础，综合考虑服役环境、隧道周边环境特征、结构形式、施工工艺等确定监测项目，满足安全预警及状态评估的要求，同时兼顾毗邻建（构）筑物结构安全、设计验证、正常使用功能等需求。具体监测项目可在表 4 选择。

表4 二次衬砌健康监测内容

监测类别	监测内容-应测项	监测内容-可测项
工作条件监测	内水压力	外水压力、界面水压力、流速、温度、腐蚀性离子、振动加速度等
结构应力监测	钢筋应力、混凝土应力	接触面压力等
结构变形监测	混凝土裂缝、拱顶下沉	断面收敛、差异沉降、变形缝伸缩、变形缝错台、断面扭转、断面倾斜等
结构材料监测	混凝土碳化深度	钢筋腐蚀程度等

8.2.3 结构监测区域与断面设置应符合下列规定：

- a) 应在隧道结构受力敏感地段和地质环境复杂地段设置监测区域，及时掌握该区域内隧道结构与地质环境的状态，区域的选取宜考虑以下因素：
 - 1) 隧道所处地质与环境特点；
 - 2) 隧道自身结构特点；
 - 3) 突发风险的影响；
 - 4) 邻近敏感建构筑物区域；
 - 5) 外部荷载较大或结构内力较大或水流冲磨作用较大的区域；
 - 6) 运营期间可能出现危及隧道结构安全事故的区域。
- b) 监测断面应从监测区域中进行选取，主要考虑以下内容：
 - 1) 应为区域内风险较大的位置；
 - 2) 应具有一定的典型性与代表性；
 - 3) 差异沉降测点应覆盖整个监测区域。

8.2.4 二次衬砌结构健康监测测点布置应符合下列规定：

- a) 应反映监测对象的实际状态及变化趋势，且宜布置在最不利位置；
- b) 测点的位置、数量应根据结构类型、外部环境荷载作用、设计要求、施工过程、监测项目及结构分析结果确定；
- c) 测点的数量和布置范围应有冗余度，可根据实际需求增加测点；
- d) 可利用结构的对称性，减少测点布置数量，混凝土和钢筋应力监测点应在衬砌内侧和外侧对称布置；
- e) 应便于监测设备的安装、测读、维护和更换；
- f) 不应妨碍降低监测对象的安全性能与正常使用功能；
- g) 在符合上述要求的基础上，宜缩短信号的传输距离。

8.2.5 采用自动化实时监测方法不能掌握结构健康情况时，应采取替代方案，如机器人巡检、隧道排空状态下人工巡检等。

8.2.6 二次衬砌结构健康监测设计可参照 CECS 333 的规定执行。

8.3 结构健康监测施工及验收

8.3.1 二次衬砌结构健康监测系统施工质量管理应包括硬件与软件进场检查、隐蔽工程过程检查和验收、工程安装质量检查、系统自检和试运行等。

8.3.2 二次衬砌结构健康监测系统施工应不影响隧道结构承载能力。

8.3.3 硬件设施应优先选用技术成熟可靠的产品，各硬件的使用寿命应符合现行国家/行业设备标准。

8.3.4 硬件设施在安装前应进行检查、测试，确认是否满足设计文件的要求。

8.3.5 传感器、线缆安装应符合以下规定：

- a) 传感器的安装环境应符合设计文件和传感器产品说明书的要求，当安装环境超出规定时，应采取保护措施；
 - b) 在混凝土浇筑过程中，禁止振捣器触碰传感器；
 - c) 安装过程中不得猛烈敲打、强拉或抛扔传感器；
 - d) 传感器接线排列应整齐、美观，导线应绝缘良好、无损伤，标识应清晰；
 - e) 传感器接线张紧程度应适中，不得使硬件内部受到额外应力。
- 8.3.6 软件系统应与硬件匹配良好，稳定可靠，且便于维护升级。
- 8.3.7 软件系统应具备数据采集、数据预处理、数据库管理、安全评估及预警、用户界面显示功能。
- 8.3.8 二次衬砌结构健康监测系统安装完成后应进行系统调试，系统调试划分为单项调试和联合调试。
- 8.3.9 二次衬砌结构健康监测系统应在系统单项调试和联合调试合格后进行系统试运行。
- 8.3.10 二次衬砌结构健康监测系统验收应符合设计要求。
- 8.3.11 二次衬砌结构健康监测施工及验收可参照 T/CECS 765 的规定执行。

9 验收

9.1 一般规定

- 9.1.1 二次衬砌施工应进行钢筋工程、模板工程、防水工程、混凝土工程验收，并结合设计功能进行功能性试验。
- 9.1.2 二次衬砌钢筋工程、模板工程、防水工程、混凝土工程验收应以每一仓作为一个检验批，单仓长度宜与变形缝设置间距保持一致。
- 9.1.3 二次衬砌施工应在验收通过后，方可进入下一工序或者投入使用。

9.2 钢筋工程

- 9.2.1 二次衬砌钢筋加工及安装工程的质量验收应符合 GB 50204 的规定。
- 9.2.2 二次衬砌钢筋与外衬管片连接钢筋数量、方式、长度等应符合设计要求。
- a) 检查数量：全数检查。
 - b) 检查方法：观察检查，钢尺量测。
- 9.2.3 二次衬砌钢筋应安装牢固，受力钢筋的安装位置、锚固方式应符合设计要求。
- a) 检查数量：全数检查。
 - b) 检查方法：观察，尺量。
- 9.2.4 完成后的二次衬砌结构应进行钢筋间距和保护层的无损检测，其钢筋保护层允许偏差为 $\pm 5\text{mm}$ 。
- a) 检查数量：每 100 m 结构检测一个断面。
 - b) 检查方法：钢筋无损检测仪检测。

9.3 模板工程

- 9.3.1 二次衬砌模板及支架工程的质量验收应符合 GB 50204 的规定。
- 9.3.2 二次衬砌混凝土浇筑前应对模板及支架工程模板对中精度进行检查，模板顶点与管片顶点水平允许偏差 3 mm。
- a) 检查数量：全数检查。
 - b) 检查方法：吊线、钢尺量测。
- 9.3.3 模板支立前应清理干净并涂刷隔离剂，铺设应牢固、平整、接缝严密、不漏浆。

- a) 检查数量：全数检查。
- b) 检查方法：观察检查。

9.3.4 模板安装应符合下列规定：

- a) 模板接缝不应漏浆。
- b) 相邻两块模板接缝高低差不应大于 2mm。
- c) 检查数量：全数检查。
- d) 检查方法：观察检查，钢尺量测。

9.4 防水工程

9.4.1 二次衬砌防水工程的质量验收应符合 GB 50208 的规定。

9.4.2 二次衬砌混凝土结构不得有线流和漏泥砂现象，渗漏水满足隧道设计防水标准。

- a) 检查数量：全数检查。
- b) 检查方法：观察检查和尺量。
- c) 检查方法：观察检查和检查隐蔽工程验收记录。

9.4.3 二次衬砌混凝土结构的施工缝、变形缝、埋设件等设置和构造应符合设计要求。

- a) 检查数量：全数检查。
- b) 检查方法：观察检查和检查隐蔽工程验收记录。

9.4.4 二次衬砌混凝土结构变形缝止水带埋设位置应准确，其中间空心圆环与变形缝的中心线应重合。

- a) 检查数量：全数检查。
- b) 检查方法：观察检查和检查隐蔽工程验收记录。

9.4.5 止水带不应穿孔或用铁钉固定。端头模板支立平面位置的允许偏差应为±10mm。

- a) 检查数量：全数检查。
- b) 检查方法：观察检查，钢尺量测。

9.5 预应力工程

9.5.1 二次衬砌预应力工程的质量验收应符合 GB 50204 的规定。

9.5.2 预应力张拉前，应对二次衬砌结构混凝土强度进行检验。同条件养护的混凝土立方体试件抗压强度应符合设计要求，当设计无具体要求时应达到配套锚固产品技术要求的混凝土最低强度且不应低于设计混凝土强度等级值的 80%。

- a) 检查数量：全数检查。
- b) 检查方法：检查同条件养护试件抗压强度试验报告。

9.5.3 对后张法预应力结构，钢绞线出现断裂或滑脱的数量不应超过同一截面钢绞线总根数的 3%，且每根断裂的钢绞线断丝不得超过一丝。

- a) 检查数量：全数检查。
- b) 检查方法：观察，检查张拉记录。

9.5.4 预留孔道灌浆后，孔道内水泥浆应饱满、密实。

- a) 检查数量：全数检查。
- b) 检查方法：观察检查，检查灌浆记录。

9.5.5 预应力钢筋进场时，应进行外观检查，其外观质量应符合下列规定。

- a) 有粘结预应力筋的表面不应有裂纹、小刺、机械损伤、氧化铁皮和油污等，展开后应平顺、不应有弯折。

- b) 无粘结预应力钢绞线护套应光滑、无裂缝，无明显褶皱，轻微破损处应外包防水塑料胶带修补，严重破损者不得使用。
- c) 检查数量：全数检查。
- d) 检查方法：观察检查。

9.5.6 预应力筋张拉质量应符合下列规定：

- a) 采用应力控制方法张拉时，张拉力下预应力筋的实测伸长值与计算伸长值的相对允许偏差为 $\pm 6\%$ 。
- b) 最大张拉力应符合 GB 50666 的规定。
- c) 检查数量：全数检查。
- d) 检查方法：检查张拉记录。

9.6 混凝土工程

9.6.1 二次衬砌混凝土结构的质量验收应符合 GB 50204 的规定。

9.6.2 二次衬砌混凝土结构应进行厚度检测，允许偏差、检查数量、检查方法应符合表 5 的规定。

表5 二次衬砌施工质量的允许偏差表

检查项目		允许偏差 mm	检查数量		检查方法
			范围	点数	
1	结构厚度	± 15	每100m	不少于1点	雷达无损检测
2	结构密实度	/	每10m	不少于3点	
3	钢筋保护层厚度	± 5	每100m	不少于1点	钢筋无损检测仪检测
4	表面平整度	10	每施工段	不少于1点	沿隧道轴向用2m直尺量测
5	隧道直顺度	15		不少于1点	沿隧道轴向用20m小线测

9.6.3 二次衬砌混凝土结构应进行结构密实度检测，检查数量、检查方法应符合表 5 的规定。

9.6.4 二次衬砌混凝土结构线形平顺，表面平整、光洁，表面平整度、隧道直顺度的允许偏差、检查数量、检查方法应符合表 5 的规定。

9.6.5 二次衬砌混凝土结构钢筋保护层厚度应符合设计要求，允许偏差、检查数量、检查方法应符合表 4 的规定。

9.6.6 二次衬砌混凝土结构外观质量不应有严重缺陷；对已经出现的严重缺陷，应由施工单位提出技术处理方案，并经监理单位认可后进行处理；对裂缝或连接部位的严重缺陷及其他影响结构安全的严重缺陷，技术处理方案尚应经设计单位认可。对经处理的部位应重新验收。

- a) 检查数量：全数检查。
- b) 检查方法：观察检查，检查处理记录。

9.6.7 二次衬砌混凝土强度等级、抗渗等级和限制膨胀率符合设计要求。

- a) 检查数量：每连续浇筑一次混凝土为一验收批。
- b) 检查方法：检查混凝土抗压强度、抗渗试块报告 and 水中养护 14d 后的限制膨胀率检验报告。

9.6.8 二次衬砌混凝土结构外观质量不应有一般缺陷。

- a) 检查数量：全数检查。
- b) 检查方法：观察检查，检查处理记录。

9.7 防腐蚀工程

- 9.7.1 二次衬砌防腐结构的质量验收应符合 GB 50212 的规定。
- 9.7.2 防腐涂料所用的材料及配合比应符合设计要求。检查方法：检查产品合格证、产品性能检测报告、计量措施和材料进场检验报告。
- 9.7.3 防腐涂料结构的平均厚度应符合设计要求，最小厚度不得小于设计厚度的 90%。
 - a) 检查数量：按涂层面积每 100 m²抽查 1 处，每处 10 m²，且不得少于 3 处。
 - b) 检查方法：用针测法检查。

9.8 功能性试验

- 9.8.1 功能性试验前应制定专项验收方案。
- 9.8.2 水压试验或闭水试验前，应做好水源的引接、排水的疏导等方案。
- 9.8.3 有压输水隧道水压试验时，可采用注水法进行实际渗水量测定，注水法可按照 GB 50268 相关要求要求进行。
- 9.8.4 有压输水隧道水压试验不具备分段试验条件时，可全段整体试验。
- 9.8.5 有压输水隧道水压试验时，工作井深度不满足 GB 50268 试验压力要求的水头高度时，试验方案应结合工程实际和各方意见确定。
- 9.8.6 有压输水隧道水压试验实测渗水量应不大于按下式(1)计算的允许渗水量：

$$q = 0.014D_i \dots\dots\dots (1)$$

式中：
q——允许渗水量 (L/min·km) ；
D_i——管道内径 (mm) 。

- 9.8.7 无压输水隧道应进行严密性试验，严密性试验采用闭水试验时，可按照 GB 50268 相关要求要求进行。
- 9.8.8 无压输水隧道处于地下水位以下时，除设计有要求外，外衬管片及现浇钢筋混凝土二次衬砌的强度、抗渗性能检验合格，符合下列规定时，可采用内渗法进行严密性试验评定。
 - a) 二次衬砌内壁不得有线流、滴漏现象。
 - b) 对有水珠、渗水部位已进行抗渗处理。
 - c) 隧道内渗水量允许值 $q \leq 2[L/(m^2 \cdot d)]$ 。

条文说明

4 基本规定

4.3 输水隧道作为重大民生工程，通常服役环境复杂，开展隧道结构健康监测，对于隧道的安全长久运营具有重要意义。推荐有条件的新建盾构法输水隧道开展隧道结构健康监测，为项目的运行维护提供指导。

5 材料

5.2.1 当现浇钢筋混凝土二次衬砌不参与受力，仅作为磨耗、防蚀层等功能时，混凝土强度等级可适当降低。

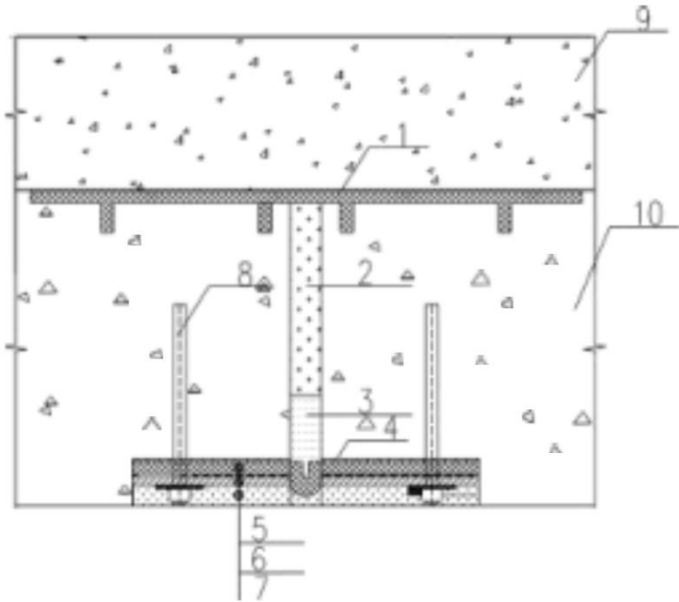
6 设计

6.3.1 双层衬砌通常包含叠合式、复合式和分离式三种类型，其中分离式双层衬砌考虑外衬和二次衬砌分别单独受力。对于采用现浇钢筋混凝土二次衬砌的盾构隧道，采用叠合式及复合式相对更加经济。

6.3.13 外衬管片螺栓手孔、接驳器、螺栓孔等处设置构造加强钢筋可以改善外衬管片与二次衬砌间的受力传递，避免后期运营过程中外衬管片结构开裂。

6.4.4 当二次衬砌厚度较小时，中埋式止水带对接缝处混凝土起到一定的分隔作用，混凝土难以振捣到位，易造成施工缝及变形缝处混凝土不密实，形成渗漏隐患。

内装可卸式止水带指止水带安装于衬砌的内表面，采用可拆卸螺栓固定。适用于输水隧道的内装可卸式止水带如下图1所示。



标引序号说明：

- 1—外贴式止水带；
- 2—填缝板；
- 3—改性聚硫密封胶；
- 4—防水涂料；
- 5— Ω 橡胶止水带；

- 6—不锈钢压板；
- 7—聚合物水泥砂浆；
- 8—不锈钢膨胀型机械锚栓；
- 9—外衬管片；
- 10—现浇钢筋混凝土二次衬砌。

图1 内装可卸式止水带设计示意

6.5.6 混凝土本体防腐蚀措施主要有混凝土质量和构造措施，通过提高混凝土强度、密实性和抗渗性，控制裂缝和保护层厚度，提高施工质量，降低氯离子渗入对钢筋的腐蚀，减小环境中化学腐蚀离子和微生物代谢产生的腐蚀性介质对混凝土的损伤，达到混凝土耐久性要求。

混凝土附加防腐蚀措施是在本体措施基础上，对腐蚀风险较高的重要构件或关键部位，采取的附加抗氯离子、化学腐蚀离子、微生物代谢腐蚀介质防腐蚀措施。

7 施工

7.1.1 表3外衬管片结构变形稳定指标参照GB 50911选取，其中变化速率参照2013版表9.3.5选取，累计值上限参照表9.2.2-1选取。以变化速率判定结构是否趋于稳定，以累计值上限判定结构的最终稳定状态是否满足要求。

7.4.2 考虑盾构法隧道通常为全圆隧道，采用轨行式设计可方便台车定位，同时降低水平运输安全风险。

7.4.4 由于管片外衬的存在，二次衬砌施工完成后不会立即参与承受来自外部的水土压力，故视二次衬砌不承受外荷载。为避免过早拆模引发二次衬砌开裂，当设计无要求时可以10 MPa作为拆模控制强度。

7.5.2 试验表明，当水平一次泵送距离超过 500 m 后，混凝土扩展度损失显著提升，堵管概率大幅增加，故不推荐水平一次泵送距离超过 500 m，超过时可考虑采用接力泵送。

7.5.3 考虑盾构法隧道通常为全圆隧道，二次衬砌混凝土浇筑拱顶难密实，保障拱顶混凝土浇筑密实应作为质量控制的重点。

8 结构健康监测

8.2.5 人工巡检通常适用于具备检修条件的隧道。采用人工巡检时，需制定针对性的人工巡检方案，将隧道排空并采取周密的安全防护措施。

8.3.3 硬件设施的寿命对整个结构健康监测系统能否正常工作影响重大，且输水隧道一旦损坏更换较为困难，因此选用技术成熟可靠的产品至关重要。

9 验收

9.8.4 盾构法有压输水隧道通常长度较长，断面较大。根据GB 50268，采用水压试验时，试验压力较大，若采用分段试验，需在隧道中间竖井内施工封堵墙，封堵难度大，后续拆除易对隧道永久结构造成不利影响。

9.8.5 根据 GB 50268，盾构法有压输水隧道二次衬砌水压试验压力应取 1.5P（P——输水隧道工作压力），当 P 值较大时，按 1.5P 试验压力开展注水试验时，竖井内水体的顶标高可能超过竖井结构顶标

高，此情况需采取结构物接高、调整试验压力等方案。

9.8.7 盾构法无压输水隧道地下水位通常高于隧道底，且顶部存在覆土，闭气法试验不适用。

9.8.8 内渗法指在隧道施工工况（无内水压）观测是否存在外水内渗情况，对运营期间是否存在外水入渗或内水外渗的情况做出判断。
