

中国工程建设协会标准

盾构法输水隧道结构设计规程

Technical Specification for Structural Design of Shield Hydraulic
Tunnel

（征求意见稿）

中国工程建设协会标准

盾构法输水隧道结构设计规程

Technical Specification for Structural Design of Shield Hydraulic
Tunnel

CECS×××: 2018

主编单位： 上海市政工程设计研究总院（集团）有限公司

批准单位： 中 国 工 程 建 设 标 准 化 协 会

施行日期： 2 0 1 8 年 × 月 × 日

2018 北 京

中国工程建设标准化协会公告

第xxx号

关于发布《盾构法输水隧道结构设计规程》的公告

根据中国工程建设标准化协会《关于印发<2011年第二批中国工程建设标准化协会标准制定、修订计划>的通知》（建标协字[2011]111号）的要求，由上海市政工程设计研究总院（集团）有限公司等单位编制的《盾构法输水隧道结构设计规程》，经中国工程建设标准化协会组织审查，现批准发布，编号为CECSxxx：2018，自2018年xx月1日起实施。

中国工程建设标准化协会

二〇一八年xx月xx日

前 言

根据中国工程建设标准化协会关于印发《2011 年第二批工程建设协会标准制订、修订计划》的通知（建标协字[2011]111 号）要求，制定本规程。

近年来我国已施工完成的大直径盾构法隧道越来越多，而输水隧道不同于常用的无内压隧道，在内水压压力作用下，衬砌受力形式、计算方法、构造要求和耐久性等均有很大不同，盾构法的输水隧道包括市政给排水管道、排蓄水隧道、大型水工隧洞等。

本规程共分为 10 章和 6 个附录，主要内容包括：总则、术语和符号、基本规定、材料、荷载分类与组合、结构选型、结构计算、衬砌构造规定、防水设计、抗震设计等。

根据国家计委计【1986】1649 号文《关于请中国工程建设标准化委员会负责组织推荐性工程建设标准试点工作的通知》的要求，现批准《盾构法输水隧道结构设计规程》编号为CECS×××:2018，推荐给工程建设、设计、施工和使用单位采用。

本规程由中国工程建设标准化协会管道结构委员会（TC17）归口管理，由上海市政工程设计研究总院（集团）有限公司负责解释，在使用中如发现需要修改或补充之处，请将意见和资料寄交解释单位（上海市中山北二路 901 号，邮政编码 200092）。

主 编 单 位： 上海市政工程设计研究总院（集团）有限公司

副主编单位： 长江勘测规划设计研究院

参 编 单 位： 北京市市政工程设计研究总院有限公司

武汉市政工程设计研究院有限责任公司

同济大学

主要起草人： 周质炎 符志远 程 斌 （以下按姓氏笔画排列）

王 刚 王 飞 宁超列 包 蓁 宋奇叵

吴立鹏 张传建 张 鹏 孟元龙 官林星

胡群芳 袁 勇 徐 进 翟之阳

目 次

1	总 则	1
2	术语和主要符号	2
2.1	术 语	2
3	基本规定	5
3.1	一般规定	5
3.2	承载能力极限状态设计计算	6
3.3	正常使用极限状态设计计算	7
3.4	耐久性规定	9
4	材 料	12
4.1	混凝土	12
4.2	钢筋	13
5	荷载分类与组合	15
5.1	荷载分类	15
5.2	荷载组合	18
6	结构选型	21
6.1	一般规定	21
6.2	单层衬砌结构	21
6.3	双层衬砌结构	22
7	结构计算	24
7.1	基本规定	24
7.2	单层衬砌结构设计计算	25
7.3	双层衬砌结构设计计算	26
7.4	衬砌接头计算	27
7.5	整体稳定验算	29
8	衬砌构造规定	31

8.1	单层衬砌构造规定	31
8.2	双层衬砌构造规定	32
9	防水设计	36
9.1	一般规定	36
9.2	单层衬砌防水设计	36
9.3	双层衬砌防水设计	37
10	抗震设计	39
10.1	一般规定	39
10.2	地震反应计算	40
10.3	衬砌抗震设计	41
附录A	荷载结构模型荷载分布	42
附录B	荷载分项系数	44
附录C	地层地质特征及物理力学参数参考表	45
附录D	单层衬砌荷载结构模型计算	47
D.1	通缝拼装衬砌按荷载结构模型计算	47
D.2	错缝拼装衬砌荷载结构模型计算	48
附录E	环锚预应力	50
E.1	环锚预应力筋布置	50
E.2	环锚锚具	51
E.3	环锚组装图.....	52
E.4	环锚张拉与控制	52
附录F	防水材料材质规定	54
	本规程用词说明	56
	引用标准名录	57

Contents

1	General	1
2	Terminology and Key Symbols.....	2
2.1	Terminology.....	2
3	Fundamental Requirements	5
3.1	General Requirements	5
3.2	Design Requirements for Calculation of Ultimate Limit States	6
3.3	Design Requirements for Checking Calculation of Serviceability Limit States	7
3.4	Durability Requirements	9
4	Material	12
4.1	Concrete	12
4.2	Steel Reinforcement.....	13
5	Classification and Combination of Loads	15
5.1	Classification of Loads	15
5.2	Combination of Loads.....	18
6	Structure Type.....	21
6.1	General Requirements	21
6.2	Single Layer Lining Structure	21
6.3	Double Layer Lining Structure.....	22
7	Structure Calculation	24
7.1	General Requirements	24
7.2	Design Calculation of Single Layer Lining Structure	25
7.3	Design Calculation of Double Layer Lining Structure	26
7.4	Calculation of Lining Joints	27
7.5	Global Stability Checking	29

8	Detailing Requirements	31
8.1	Detailing Requirements of Single Layer Lining	31
8.2	Detailing Requirements of Double Layer Lining	32
9	Waterproofing Design	36
9.1	General Requirements	36
9.2	Waterproofing Design of Single Layer Lining	36
9.3	Waterproofing Design of Double Layer Lining	37
10	Seismic Design.....	39
10.1	General Requirements	39
10.2	Calculation of Seismic Reaction.....	40
10.3	Seismic Design of Lining	41
Appendix A	Load model	42
Appendix B	Load Partial Coefficient	44
Appendix C	Reference Table for Stratum Features and Mechanic Parameters	45
Appendix D	Calculation of Single Layer Lining Structure Model	47
D.1	Load-Structure Model for Straight-Jointed Lining	47
D.2	Load-Structure Model for Stagger-Jointed Lining	48
Appendix E	Loop Bolt Prestress	50
E.1	Location of Loop Prestressed Reinforcements	50
E.2	Anchor of Loop Bolt	51
E.3	Assembly Drawing of Loop Bolt	52
E.4	Stretching and Control of Loop Bolt.....	52
Appendix F	Requirements of Waterproofing Materials.....	54
	Explanation of Wording in This Specification	56
	List of Quoted Standards	57

1 总 则

1.0.1 为了在盾构法输水隧道工程中贯彻国家的技术经济政策，做到安全适用、技术先进、经济合理，特制定本规程。

1.0.2 本规程适用于圆形轮廓内直径不小于 3m，采用盾构法施工的单层和双层钢筋混凝土衬砌的输水隧道工程结构设计，内直径小于 3m 的同类输水隧道工程也可参照使用。

1.0.3 本规程系根据《工程结构可靠度设计统一标准》GB50153 等规定的原则制定；工程结构设计除应符合本规程外，尚应符合国家现行有关标准的规定。对于拟建在地震区、冻土地区、湿陷性黄土地区及膨胀土地区的盾构法输水隧道工程，尚应符合国家现行有关标准的规定。

2 术语和主要符号

2.1 术语

2.1.1 盾构法输水隧道 Shield Hydraulic Tunnel

采用盾构机械防止土体坍塌，同时进行开挖、推进，并进行单层或双层衬砌作业的输水隧道，包括给水隧道、排水隧道和蓄水隧道，本规程统称输水隧道。按隧道的功能可分为有压输水隧道和无压输水隧道。

2.1.2 荷载效应 Load Effect

由荷载引起结构或结构构件的反应，例如内力、变形和裂缝等。

2.1.3 衬砌结构 Lining Structure

承受隧道周围的水土压力，内部水压力等荷载的非临时性围护结构；按受力性质可分为单层衬砌结构和双层衬砌结构。

2.1.4 单层衬砌结构 Single Layer Lining Structure

由盾构机拼装形成具有防水功能的管片环结构，除自重外，外部荷载主要为土压力、外水压力，内部荷载主要为内水压力。

2.1.5 双层衬砌结构 Double Layer Lining Structure

由外层衬砌、内层衬砌和界面结构物组成，外层衬砌为具有防水功能的管片环结构，内层衬砌为现浇钢筋混凝土结构或预应力混凝土结构；分隔外衬与内衬的结构物为界面结构，双层衬砌结构的外衬先于内衬形成，单独承担自重和外部水土压力等荷载；内衬形成后，对于不同的界面结构，可分为叠合式双层衬砌、复合式双层衬砌和分离式双层衬砌。

2.1.6 叠合式双层衬砌结构 Superimposed Double Layer Lining Structure

内衬直接浇筑到外衬上，内衬形成后与外衬形成叠合式结构，界面结构通常是连接内衬与外衬的结构措施，如接触面加糙、阻滑键和插筋等，并以此实现双层衬砌共同分担其后作用的自重、内水压力等荷载，是联合受力结构的一种。

2.1.7 复合式双层衬砌结构 Combined Double Layer Lining Structure

双层衬砌界面结构为传力垫层，由外衬、界面结构、内衬形成复合式结构，共同分担其后作用的自重、内水压力等荷载，具联合受力结构特性，外衬与内衬两者的分担比例主要取决于界面结构的线刚度（传力垫层弹性模量与其厚度的比值），也是一种联合受力结构。

2.1.8 分离式双层衬砌结构 Separated Double Layer Lining Structure

当分隔内衬与外衬的界面结构为足够厚度的软垫层，或内衬与外衬分离，仅靠局部支点支撑到外衬上，而且内衬与外衬力的传递可忽略时称为分离式结构，相应外衬、内衬可视为分别承担其上荷载，具单独受力结构特性。

2.1.9 预应力混凝土内衬结构 Prestressed Concrete Lining Structure

双层衬砌中的内衬混凝土浇筑后，当达到规定的强度时，通过张拉预应力筋并在结构上锚固，而建立的预应力混凝土结构。

2.1.10 接缝 Joint

接缝是拼装式管片之间纵向缝和环向缝的总称。

2.1.11 结构缝 Structural Joint

内层衬砌根据结构设计和施工需要而采取分割混凝土衬砌的总称；结构缝兼具适应变形作用时又称为变形缝。

2.1.12 水锤效应 Water Hammer Effect

有压输水过程，由于瞬变流动在衬砌迎水面上作用的弹性压力波动。

2.1.13 界面结构 Interface Structure

双层衬砌结构中，分隔外衬与内衬的结构物称为界面结构可简称为界面。当界面结构物为厚度足够的软垫层时，双层衬砌具单独受力结构特性；当界面结构物为传力垫层时，双层衬砌具联合受力结构特性；界面结构无垫层时为其特例，称为叠合结构。

2.1.14 界面水压力 Interface Water Pressure

复合式双层衬砌结构和分离式双层衬砌结构，当渗漏水进入界面，将对外衬内壁面和内衬外壁面产生水压力，称为界面水压力，其值与界面排水

通畅性有关，当排水不畅时，界面水压力较大，需根据复核计算情况对界面结构采取加强排水，以及对外衬采取加强防渗措施。

2.1.15 地层抗力 Stratum Resistance

地层约束衬砌变形而产生的约束力即为地层抗力，由地层与衬砌协调变形确定。

2.1.16 温度效应 Temperature Effect

双层衬砌结构内衬混凝土现浇后，因形成结构时的温度与使用期水体温度的温差，造成内衬结构伸缩，当受到外衬约束而在衬砌结构产生应力增量的效应。

2.1.17 环锚预应力 Hoop Bolt Prestress

环锚预应力系指埋于混凝土结构的环形预应力筋，绕行一圈后两端分别套入同一块特制的夹片类工作锚板（统称环锚锚具），通过一台穿心式千斤顶顶压工作锚板实施张拉、卸荷锚固后，在混凝土结构中产生预压应力，详见附录E。

2.1.18 预留槽 Reserved Groove

为了实施环锚预应力，在双层衬砌内衬的内壁面预留可放置环锚锚具，并可供千斤顶在其中对预应力筋张拉、锚固的坑槽，简称预留槽；张拉、锚固后预留槽采用微膨胀混凝土回填，并对槽壁采取必要的防水措施。

2.1.19 荷载结构模型 Load-Structure Model

将衬砌作为承受荷载的结构，考虑地层抗力作用，采用结构力学方法计算衬砌结构内力，并进行结构截面设计的结构计算模型。

2.1.20 地层结构模型 Stratum-Structure Model

将衬砌和地层视为整体共同受力结构，按变形协调条件，可采取有限元计算方法，分别计算衬砌与地层应力分布的结构计算模型。为便于按实体建模的衬砌进行截面设计，可将衬砌截面的应力转换为截面内力，再进行相应的结构设计。

3 基本规定

3.1 一般规定

3.1.1 工程设计应根据输水工艺要求，结合工程沿线的建设条件，通过技术经济、功能要求、环境影响和社会效益的综合评价，选择结构型式和施工方法。

3.1.2 盾构输水隧道布置应综合考虑地形、地质、水力、使用、施工等因素影响，还应尽量避免与其他建筑物交叉，当无法避免时，应采取必要措施，以确保盾构输水隧道和所交叉建筑物运行安全。

3.1.3 盾构输水隧道采用有压输水时，应根据地形与地质条件、输水压力、衬砌糙率、与交叉建筑物相互影响，以及施工条件选择单层衬砌结构或双层衬砌结构。

3.1.4 盾构输水隧道采用无压输水时，相应各种运行工况，水面以上净空应符合相关行业有关规定。

3.1.5 盾构输水隧道边坡式进水口（含出口——下同）或岸塔式进水口应选择边坡稳定、岩土条件较好的位置，否则宜结合盾构机始发或到达采用竖井式进水口；进水口布置和设计除应符合本规程外，尚应符合《水利水电工程进水口设计规范》（SL285）有关规定。

3.1.6 结构计算主要应基于荷载结构模型，考虑地层抗力，采用结构力学方法进行；对于与建筑物交叉（含洞与洞交叉）的特殊洞段和通过游荡性河流河床的洞段应同时辅以地层结构模型，采用有限单元法，计算衬砌结构内力，再按 3.2 节有关规定进行计算。

3.1.7 盾构输水隧道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，并应遵照本规程有关构造的规定。

3.1.8 隧道的安全等级和设计使用年限应符合现行国家标准《工程结构可靠性设计统一标准》GB50153 的规定，隧道结构中各类结构构件的安全等级，

宜与整个结构的安全等级相同。

3.2 承载力极限状态设计计算

3.2.1 承载力极限状态设计应包括下列内容：

- 1 衬砌和相关结构构件极限承载力计算；
- 2 有抗震设防要求时，应进行抗震承载力计算；
- 3 进行抗浮、抗滑动、抗倾覆验算。

3.2.2 承载力极限状态设计时，采用式 3.2.2 进行

$$\gamma_z S \leq R \quad (3.2.2)$$

式中： γ_z ——结构重要性系数，按表 3.2.2 分为三级；

表 3.2.2 盾构输水隧道建筑物安全等级划分

建筑物安全等级	1	2	3
γ_z	1.1	1.0	0.9
注：对于失事后损失巨大的次要建筑物和临时建筑物，结构重要性系数可提高一级；对于失事后损失不大的主要建筑物和次要建筑物，结构重要性系数可降低一级。 S ——荷载效应组合设计值，按 3.2.3 条规定计算； R ——极限状态下结构构件抗力设计值，按 3.2.4 条规定计算确定。			

3.2.3 钢筋混凝土结构构件承载力极限状态的荷载效应组合设计值采用通式 3.2.3 表示；钢结构等其它构件按相关规范规定计算：

$$S = \sum_{i=1}^m \gamma_{0i} S_{0i} + \sum_{j=1}^n \gamma_{1j} S_{1j} + \gamma_2 S_2 \quad (3.2.3)$$

1 通式 3.2.3 第 1 项表示永久荷载效应，第 2 项为可变荷载效应，第 3 项为偶然荷载效应；对于没有偶然荷载参与的组合，只取公式的前两项；有偶然荷载参与的组合，只取公式的第 1 和第 3 项；

2 符号说明：

S ——荷载效应组合设计值；

S_{0i} 、 γ_{0i} ——按荷载标准值计算的第 i 个永久荷载效应及其荷载分项系数；

S_{1j} 、 γ_{1j} ——按荷载标准值计算的第 j 个可变荷载效应及其荷载分项系

数；

S_2 、 γ_2 ——按荷载标准值计算的 1 个偶然荷载效应及其荷载分项系数；

m 、 n ——分别为参与荷载组合的永久荷载个数和可变荷载个数。

上述 γ_{0i} 、 γ_{1j} 、 γ_2 分项系数按附录B有关规定取用。

3.2.4 钢筋混凝土结构构件承载能力极限状态的结构构件抗力 R 设计值采用通式 3.2.4 表示；钢结构等其它构件按相关规范规定计算：

$$R = R(f_c, f_s, \alpha_k) / \gamma_{Rd} \quad (3.2.3)$$

式中： f_c 、 f_s ——在基本荷载效应组合和可变荷载效应组合中，分别为混凝土、钢筋的强度设计值；在偶然荷载效应组合中，需将设计值 f_c 、 f_s 对应地改为标准值： f_{ck} 、 f_{yk} （或 f_{pyk} ），其取值均详见本规程第 4 章；

α_k ——几何参数标准值；

γ_{Rd} ——结构构件的抗力模型不定性系数：静力设计取 1.0，对于抗力不确定性较大的结构构件，根据具体情况取大于 1.0 的数值；对于抗震设计，采用承载能力抗震调整系数 $\gamma_{RE}=0.85$ 替代 γ_{Rd} 。

3.3 正常使用极限状态设计计算

3.3.1 正常使用极限状态验算采用通式 3.3.1 进行：

$$S_K \leq C \quad (3.3.1)$$

式中： S_K ——正常使用极限状态标准荷载组合设计值，按 3.3.2 条规定计算；

C ——结构构件达到正常使用要求的效应（变形、应力、裂缝宽度等）的限值。

3.3.2 钢筋混凝土结构构件正常使用极限状态的荷载效应组合设计值由永久荷载效应和可变荷载效应两项组成，采用通式 3.3.2 表示；钢结构等其它构件按相关规范规定计算：

$$S_k = \sum_{i=1}^m S_{0i} + \sum_{j=1}^n S_{1j} \quad (3.3.2)$$

式中： S_k —— 标准荷载效应组合设计值；

S_{0i} —— 第 i 个永久荷载标准值效应；

S_{0j} —— 第 j 个可变荷载标准值效应；

m 、 n —— 分别为参与荷载效应组合的永久荷载数和可变荷载数。

3.3.3 钢筋混凝土结构构件的最大裂缝宽度可按准永久组合并考虑长期作用影响的效应计算，预应力混凝土结构构件的最大裂缝宽度可按荷载标准组合并考虑长期作用影响的效应计算；钢结构等其它构件按相关规范规定计算：

1 结构构件正截面的受力裂缝控制等级分为三级，等级划分及要求应符合下列规定：

一级——严格要求不出现裂缝的构件，受拉边缘混凝土不应出现拉应力；

二级——一般要求不出现裂缝的构件，受拉边缘混凝土拉应力不应大于混凝土抗拉强度的标准值；

三级——允许出现裂缝的构件：裂缝宽度不应超过表 3.3.3 规定的最大裂缝宽度限值。

表 3.3.3 结构构件的裂缝控制等级及最大裂缝宽度限值

环境类别	钢筋混凝土结构		预应力混凝土结构	
	裂缝控制等级	裂缝宽度限值（mm）	裂缝控制等级	裂缝宽度限值（mm）
一	三级	0.30	三级	0.20
二a		0.20		二级
二b			一级	
三a、三b			——	

注：表中环境类别参照现行《混凝土结构设计规范》GB50010 确定。

2 对于发生裂缝后会引引起严重渗漏，以至影响结构安全的构件，应按一级裂缝或二级裂缝控制设计，根据工程工作条件而定。

3.3.4 采用荷载标准组合设计的输水隧道衬砌，各工作阶段衬砌变形应控制在不大于 5‰ 的直径，管片接缝最大张开控制值应控制在不大于 6mm。应结合工程防水措施，以确保工程安全为前提确定控制值。

3.4 耐久性规定

3.4.1 隧道结构混凝土耐久性应遵守下列原则：

1 结构构件正截面的受力裂缝控制等级分为三级，等级划分及要求应符合下列规定：

2 采用合理的结构布置、结构构造，以满足使用过程中安全运行、检修、维护的要求；

3 隧道结构混凝土耐久性设计，包括所处的环境类别的分类、环境作用等级的分级等内容，应符合国家现行标准《混凝土结构耐久性设计规范》(GB/T50476)或《水利水电工程合理使用年限及耐久性设计规范》(SL 654)的规定。

4 提出对混凝土施工过程的质量控制要求。

3.4.2 设计施工年限 100 年的隧道主体结构，应按表 3.4.2 确定和检测混凝土的耐久性设计参数。

表 3.4.2 设计年限 100 年输水隧道主体结构混凝土耐久性设计参数

结构名称		盾构法隧道管片	
结构部位		外弧面	内弧面
最小保护层厚度（mm）		50	45
混凝土最低强度等级		C50	
补充防护措施		防水防腐涂层抗碳化涂层	
最大水胶比		0.35	
最小胶凝材料用量（kg/m³）		430	
最大胶凝材料用量（kg/m³）		530	
渗透性能	电通量（C）	≤1000	
	氯离子扩散系数（10-12 m²/s）	≤1.5	
抗碳化性能	快速碳化深度（mm）	1.0	
注：			
1、保护层厚度是指混凝土外表面至最外层钢筋外表面的最短距离；			
2、胶凝材料由水泥和优质粒化高炉矿渣微粉、粉煤灰、硅微粉等掺和材料组成；			
3、电通量，是指混凝土标准养护 28d后，参照《海港工程混凝土结构防腐蚀技术规范》（JTJ275）测得的数据；			
4、氯离子扩散系数，是指混凝土标准养护 28d后，放入标准溶液后浸泡 90d时			

测得的数值；

5、快速碳化深度，是指混凝土标准养护 28d 后，参照《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法》（GBJ82）测得的数值；

3.4.3 配置有耐久性要求的混凝土原材料应满足以下要求：

1 应采用硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥，其质量应符合现行国家标准《硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥》（GB175）的要求，C3A 含量不宜超过 8%，水泥碱含量应小于 0.60%；管片混凝土应采用强度等级不小于 42.5 的硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥；

2 混凝土总碱含量：设计年限 100 年的结构不应大于 2.5kg/m^3 ，设计年限 50 年的结构不应大于 3.0kg/m^3 ；混凝土中的氯离子含量不应大于胶凝材料总量的 0.1%；

3 粉煤灰和矿物外加剂应符合《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》（GB1596）、《高强高性能混凝土用矿物外加剂》（GB/T18736）等现行国家标准的有关规定；

4 粗骨料应使用碎石，其品质应符合现行国家标准《建筑用卵石、碎石》（GB/T14685）的规定，碎石粒径宜为 5~25mm，其氯离子含量不应大于 0.02%、含泥量不应大于 0.7%、泥块含量不应大于 0.3%、针片状含量不应大于 8%，并不得使用具有碱活性的骨料；

5 细骨料应使用中砂，其品质应符合现行国家标准《建筑用砂》（GB/T14684）的规定，其细度模数应为 2.5~3.0；

6 外加剂的质量与使用要求应分别符合现行国家标准《混凝土外加剂》（GB/T8076）、《混凝土外加剂应用技术规范》（GB50119）的规定，应选择与胶凝材料性能匹配的高效减水剂，管片用混凝土减水率应不小于 18%，管段混凝土、现浇暗埋段、敞开段混凝土减水率应不小错误!链接无效。于 12%。

3.4.4 防水材料特性要求如下：

设计使用年限为 100 年的盾构法输水隧道，管片接头钢件和纵、横向连接螺栓均应基于结构设计直径增加 2mm 的防腐厚度。

3.4.5 防水材料特性有关规定参见附录 F。

3.4.6 防水混凝土的设计抗渗等级，应符合表 3.4.6 的规定。

表 3.4.6 防水混凝土设计抗渗等级

工程埋置深度H(m)	设计抗渗等级
$H < 10$	P4
$10 \leq H < 20$	P6
$20 \leq H < 30$	P8
$H \geq 30$	P12
注： 1 本表适用于 I、II、III类围岩（土层及软弱围岩）； 2 山岭隧道防水混凝土的抗渗等级可按国家现行有关标准执行； 3 水工结构抗渗等级可按照《水工混凝土结构设计规范》SL191 确定。	

4 材 料

4.1 混凝土

4.1.1 混凝土强度等级应按立方体抗压强度标准值确定。立方体抗压强度标准值系指按标准方法制作，养护的边长为 150mm 的立方体试件，在 28d 或设计规定的龄期以标准试验方法得到的具有 95%保证率的抗压强度值。

4.1.2 混凝土轴心抗压强度的标准值 f_{ck} 应按表 4.1.2-1 采用；轴心抗拉强度标准值 f_{tk} 应按表 4.1.2-2 采用。

表 4.1.2-1 混凝土轴心抗压强度标准值（单位：N/mm²）

强度种类	符号	混凝土强度等级									
		C15	C20	C25	C30	C35	C40	C45	C50	C55	C60
轴心抗压	f_{ck}	10.0	13.4	16.7	20.1	23.4	26.8	29.6	32.4	35.5	38.5

表 4.1.2-2 混凝土轴心抗拉强度标准值（单位：N/mm²）

强度种类	符号	混凝土强度等级									
		C15	C20	C25	C30	C35	C40	C45	C50	C55	C60
轴心抗拉	f_{tk}	1.27	1.54	1.78	2.01	2.20	2.39	2.51	2.64	2.74	2.85

4.1.3 混凝土轴心抗压强度的设计值 f_c 应按表 4.1.3-1 采用；轴心抗拉强度的设计值 f_t 应按表 4.1.3-2 采用。

表 4.1.3-1 混凝土轴心抗压强度设计值（单位：N/mm²）

强度种类	符号	混凝土强度等级									
		C15	C20	C25	C30	C35	C40	C45	C50	C55	C60
轴心抗压	f_c	7.2	9.6	11.9	14.3	16.7	19.1	21.1	23.1	25.3	27.5

表 4.1.3-2 混凝土轴心抗拉强度设计值（单位：N/mm²）

强度种类	符号	混凝土强度等级									
		C15	C20	C25	C30	C35	C40	C45	C50	C55	C60
轴心抗拉	f_t	0.91	1.10	1.27	1.43	1.57	1.71	1.80	1.89	1.96	2.04

4.1.4 混凝土等级测定参照《水工混凝土试验规程》(SL 352)，表 4.1.2-1、表 4.1.2-2、表 4.1.3-1、表 4.1.3-2 所示混凝土等级均相应 28 天龄期混凝土。

4.1.5 龄期 28 天的混凝土受压和受拉的弹性模量 E_c 可按表 4.1.5 采用，混凝土泊松比 ν_c 可取 0.167，剪变模量 G_c 可按表 4.1.5 中混凝土弹性模量的 0.4 倍采用。

表 4.1.5 混凝土弹性模量 E_c ($\times 10^4$) 单位: N/mm²

混凝土强度等级	C15	C20	C25	C30	C35	C40	C45	C50	C55	C60
E_c	2.20	2.55	2.80	3.00	3.15	3.25	3.35	3.45	3.55	3.60

4.2 钢筋

4.2.1 输水隧道衬砌当采用钢筋混凝土结构或预应力混凝土结构时，所用钢筋和预应力钢筋应按下列规定选用：

- 1 受力钢筋宜采用 HRB400 级和 HRB335 级钢筋，也可采用 RRB400 钢筋；联系筋、箍筋宜采用 HPB300 级钢筋，也可采用 HRB335 级钢筋。
- 2 预应力钢筋宜采用钢绞线，亦可采用钢丝或螺纹钢筋。

4.2.2 钢筋强度标准值应具有不小于 95% 的保证率，普通钢筋的屈服强度标准值 f_{yk} 、极限强度标准值 f_{stk} 应按表 4.2.2-1 采用，预应力钢筋屈服强度标准值 f_{pyk} 、极限强度标准值 f_{ptk} 应表 4.2.2-2 采用。

表 4.2.2-1 普通钢筋强度标准值

种类		符号	d (mm)	f_{yk}	f_{stk}
热轧钢筋	HPB300		6~22	300	420
	HRB335		6~50	335	455
	HRB400		6~50	400	540
	RRB400		8~40	400	540
注： 1、热轧钢筋直径d系指公称直径。 2、当采用直径大于 40 mm的钢筋时，应有可靠的工程经验。					

表 4.2.2-2 预应力钢筋强度标准值

种类		符号	公称直径d (mm)	f_{pyk} (N/mm ²)	f_{ptk} (N/mm ²)
常用钢绞线	1×2		8、10、12	——	1570、1860
	1×7		15.2	——	1570、1860
			15.7	——	1770、1860
预应力螺纹钢筋			18、25	785	980
			32、40	930	1080
注：当需采用其它品种的钢绞线或钢丝时，可参照现行《混凝土结构设计规范》(GB					

50010) 采用。

4.2.3 钢筋弹性模量可按表 4.2.3 采用。

表 4.2.3 钢筋弹性模量

钢筋种类	E_s (N/mm ²)
HPB300 级	2.1×10^5
HRB335 级、HRB400 级、RRB400 级、预应力螺纹钢筋	2.0×10^5
钢绞线	1.95×10^5
注：必要时钢绞线弹性模量可采用实测值。	

5 荷载分类与组合

5.1 荷载分类

5.1.1 隧道结构上作用的荷载应按表 5.1.1 分类

表 5.1.1 输水隧道荷载分类

荷载分类	荷载名称
永久荷载	结构自重
	地层压力
	外水压力
	预应力
	界面水压力
	内水压力
	地层弹性抗力
可变荷载	温度效应
	地面汽车荷载及其动力作用（含所引起的侧向土压力）
	施工荷载
	水锤压力
偶然荷载	灾害性荷载：地震、沉船撞击、爆炸力等
注：表中地层弹性抗力系数参考值见附录C。	

5.1.2 自重

- 1 隧道结构自重可按结构设计断面尺寸及材料重度标准值计算。
- 2 隧道衬砌的自重可作为沿着衬砌横断面中心线均匀分布的荷载，依据式 (5.1.2) 确定。

$$g = \frac{W_1}{\pi D} \quad (5.1.2)$$

式中： W_1 —— 衬砌的总重量（kN）；

g —— 自重沿衬砌横断面中心线均匀分布集度（kN/m）；

D —— 隧道衬砌横断面中心线直径（m）。

5.1.3 地层压力

- 1 竖向地层压力：浅埋隧道应按计算截面以上全覆土计算；对于覆土厚度大于 2 倍隧道外直径的深埋隧道，竖向地层压力可根据具体工程条件（地层性质、埋深等）按对结构受力较不利，选用卸载拱理论或全覆土进行

计算。

2 水平地层压力

以下算法，按对结构较不利的结果采用：

(1) 砂性土水平地层压力按水土分算，采用式 5.1.3-1 按主动土压力计算：

$$e_i = (\gamma_i h_i + q) k_a \quad (5.1.3-1)$$

式中： e_i —— 为计算点处水平地层压力集度，当 $e_i < 0$ 时，取 $e_i = 0$ ；

γ_i —— 计算点以上各层土重度的加权平均值，地下水位以上土层取天然重度；对地下水位以下土层取浮重度；

h_i —— 计算点以上各层土厚度（按卸载拱理论计算时，算至卸载拱顶）的加权平均值；

q —— 地表面均布荷载，应按实际情况取值；

k_a —— 计算点处土的主动土压力系数，采用式 5.1.3-2 计算；

$$k_a = \tan^2(45^\circ - \frac{\varphi}{2}) \quad (5.1.3-2)$$

φ —— 为计算点处的内摩擦角。

(2) 粘性土水平地层压力按水土合算，采用如下两种算法：

算法 1：采用式(5.1.3-1)计算，公式符号意义除地下水位以下土层取饱和重度外，其它同前述；

算法 2：采用式(5.1.3-3)按静止土压力计算；

$$K_0 = 1 - \sin \phi' \quad (5.1.3-3)$$

式中： K_0 —— 静止土压力系数，重大工程宜通过试验测定；

ϕ' —— 隧道围土有效内摩擦角标准值的加权平均值($^\circ$)；

(3) 水平地层压力采用经验系数计算：

通过工程类比，并基于工程经验选取侧压力系数作为主动土压力系数计算水平地层压力。

5.1.4 外水压力

外部水土压力按水土合算时，外部水压力与土压力合算为水平地层压力，不单独计算；水土压力分算时，外水压力按以下规定计算。

对工程地质、水文地质条件复杂及外水压力较大的隧道，应进行专门研究。一般砂性围土隧道外水压力可按以下要求计算：

(1) 无排水设施的隧道

按外部静水压力采用式（5.1.4）计算：

$$q_w = \gamma_w h_i \quad (5.1.4)$$

式中： q_w —— 计算点处外部静水压力集度；

γ_w —— 地下水重度；

h_i —— 地下水面至衬砌计算点深度，以对结构不利为原则确定地下水位；在陆域取历史最高地下水位或最低地下水位，在水域设计工况取设计洪水位或枯水位，校核工况取校核洪水位或枯水位。

(2) 有排水设施的隧道

可根据排水设施的可靠性和排水效果，对作用在衬砌结构上的外水压力作适当折减，其折减值可通过工程类比或渗流计算分析确定。

5.1.5 外加预应力

预应力筋因张拉收缩而对内衬产生的作用力，计算参照现行《混凝土结构设计规范》GB50010 进行。

5.1.6 界面水压力

因外衬渗漏而产生的界面水压力，按外水压力水头取值；因内衬渗漏而产生的界面水压力，按内水压力水头取值；是否需要考虑折减，视工程条件和设计要求而定。

5.1.7 内水压力

有压隧道内水压力按荷载组合要求取相应的隧道内水压计算；无压隧道内水压力按不利的自由水面确定。

5.1.8 水锤压力

有压输水过程，由于压力隧道进口或出口闸阀开度调整，导致流量瞬变而在衬砌迎水面上引起洞内压力的增减。钢管管道在准永久组合作用下，最大竖向变形限值应按下列规定采用：

5.1.9 温度效应

按迎水面衬砌（单层衬砌结构为管片环，双层衬砌结构为内衬）在形成结构时的温度与使用期温度之差，计算衬砌应力的变化。

5.1.10 地面荷载和施工荷载

1 汽车荷载及其所产生的冲击力应按照国家现行标准《城市桥梁设计荷载标准》（CJJ77）和《公路桥涵设计通用规范》（JTGD60）的有关规定计算；

2 地面荷载根据施工条件确定，一般可按 20kPa 考虑，对于大型施工机械作业区域、施工堆场、覆土厚度特别小或规划用途已定的情况，地面超载应根据实际情况分析后取用。

3 盾构反推力按盾构供应商提供的施工过程最大反推力取用。

5.1.11 地震作用

设计烈度大于 7 度（含 7 度）的输水隧道均应按现行《水工建筑物抗震设计规范》（SL 203）的规定，在抗震计算中考虑地震作用，包括结构自重和其上荷重所产生的地震惯性力、地震动土压力和水平向地震作用的动水压力，以及砂土震动液化影响等。

5.1.12 灾害性荷载

沉船、爆炸、撞击等灾害性荷载应根据工程建设条件分析后确定。

5.2 荷载组合

5.2.1 荷载（效应）组合应按下列规定确定：

1 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；

2 荷载效应组合应按施工期、运行期、检修期、地震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。

5.2.2 衬砌结构荷载组合工况

1 采用荷载结构模型对衬砌结构作横向结构计算时，荷载组合见表

5.2.2;

2 表 5.2.2 所列基本荷载组合工况主要荷载说明如下:

- ① 运行 3 工况——隧道按设计水头输水运行, 考虑温度荷载工况。
- ② 运行 2 工况——隧道按设计水头输水运行, 不计温度荷载工况, 考虑水锤荷载工况。

3 表 5.2.2 所列特殊荷载组合工况主要荷载说明如下:

- ① 运行 3 工况——隧道按设计水头输水运行, 考虑温度荷载工况。
- ② 运行 4 工况——隧道按校核水头输水运行, 不计温度荷载工况。
- ③ 运行 5 工况——对于双层衬砌隧道, 按设计水头输水运行, 因衬砌渗漏, 在内衬与外衬界面结构上作用水压力, 不计温度荷载工况。
- ④ 运行 6 工况——隧道按设计水头输水运行, 考虑淤砂压力, 不计温度荷载, 不计水锤荷载工况。
- ⑤ 检修工况——隧道排空内水, 不计温度荷载工况。
- ⑥ 施工工况 1——盾构掘进施工过程, 盾构反力作用。
- ⑦ 施工工况 2——其它施工情况。
- ⑧ 结构缝压力试验工况 1——结构缝水压按设计内水压加载。
- ⑨ 结构缝压力试验工况 2——结构缝水压按校核内水压加载。

4 表 5.2.2 所列偶然荷载组合工况以地震工况为代表, 主要荷载说明如下:

地震影响, 应考虑下列因素:

- 1 地震时地基下层土和结构的变形;
- 2 结构自重产生的惯性力;
- 3 地震时的土压力;
- 4 地震时的动水压力。

表 5.2.2 输水隧道衬砌结构横向结构计算荷载组合

荷载组合	工况	自重	螺栓预紧	地层压力	外水压力	内水压力			淤沙压力	水锤	温度	预应力	地震作用	地面荷载	结构缝水压	施工荷载	
						设计压力	校核压力	界面水压								盾构反推力	其它
基本	运行 1	√	√	√	√	√						√		√			
	运行 2	√	√	√	√	√				√		√		√			
特殊	运行 3	√	√	√	√	√					√	√		√			
	运行 4	√	√	√	√		√					√		√			
	运行 5	√	√	√	√	√		√				√		√			
	运行 6	√	√	√*	√	√			√			√		√			
	检修	√	√	√	√							√		√			
	施工 1	√	√	√	√									√			
	施工 2	√	√	√	√									√			
	试验工	√	√	√	√							√		√	√ (设		
	试验工	√	√	√*	√							√		√	√ (校		
偶然	地震	√	√	√*	√	√						√		√			

附注：

- 1、表中荷载组合中，含界面水压力的荷载组合、含充水加压检查其密封性的试验工况 1 和试验工况 2 的荷载组合，仅适用于复合式双层衬砌和分离式双层衬砌结构；预应力荷载仅适用于双层衬砌内层为预应力结构。
- 2、偶然荷载如地震、沉船撞击、爆炸力等；在偶然荷载组合中，偶然荷载仅考虑 1 个，表中偶然荷载以地震荷载为例示出。
- 3、淤沙压力指水底隧道在工程设计基准期内河道可能发生的淤积或冲刷所形成的荷载增量。
- 4、荷载计算组合不限于本表所列，应根据工程条件补充可能的不利荷载组合。

6 结构选型

6.1 一般规定

6.1.1 应根据输水隧道功能、建设环境、线路特点、地质条件，并综合考虑施工技术条件，选用单层衬砌结构或双层衬砌结构。

6.1.2 对于长大输水隧道，宜在洞内设置行车道，以方便检修期间车辆进洞巡视、检修和保养。

6.1.3 应分别配置排空洞内积水和排放渗漏水的排水设施，以满足检修期的排水要求。

6.1.4 当拟定无压输水隧道断面时，应考虑隧道可能发生的沉降量，为洞内水面以上净空留足富裕量。

6.1.5 管片环防水必须执行国家现行规范的规定。当输水隧道外部为砂性土时，应对接缝加强防渗措施，必要时内侧和外侧均采用密封垫防渗，以防止内水外渗或外水内渗冲蚀围土，对隧道整体稳定性造成不利影响。

6.1.6 在饱和含水的软弱地层中，对于与始发竖井或到达竖井相邻接的隧道段，应根据隧道与竖井之间可能发生的变形大小，在连接处和其影响范围，管片环应设置大变形缝，双层衬砌结构内衬还应加密结构缝，其缝宽与构造应能适应变形，并满足结构稳定和防水要求；对于地层变化明显的洞段，双层衬砌结构还应沿纵向加密设置结构缝。

6.1.7 隧道应有足够的覆土厚度，以确保盾构施工安全，并达到隧道抗浮稳定性的规定。

6.1.8 在盾构内拼装形成的管片环应预留二次注浆孔，在管片环退出盾构后，应及时对管片环与地层之间的空腔进行注浆，必要时还应进行二次注浆，以达到现行《盾构法隧道施工与验收规范》（GB50446）对充填系数的规定。

6.2 单层衬砌结构

6.2.1 单层衬砌结构为盾构法施工过程拼装形成的管片环结构；管片的分块、截面厚度应按地质条件、施工条件和运行要求选定。

6.2.2 无压输水隧道或直径较小的、内外水压差较低的输水隧道宜采用单层衬砌结构；对于穿行于河床（或海床）冲淤变化明显的水底隧道、内外水压差较高或输水流速较高的隧道、围土有对隧道产生偏压的隧道，不宜选用单层衬砌结构。

6.2.3 单层衬砌结构宜对管片环采用环间错缝拼装，管片厚度不宜小于内直径的 5%，混凝土强度等级不宜低于 C50；直径较小的单层衬砌结构宜由手孔较小的管片拼装而成。

6.2.4 管片环管片接头宜采用刚性接头和由高强螺栓组成的连接件，高强螺栓选用单排或双排按设计条件选定。

6.2.5 对于有纵向变形问题的隧道，管片环纵向连接宜采用直螺栓。

6.2.6 单层衬砌结构投入运行前，应封填管片内表面的孔洞，整修管片表面错台、平顺衬砌段不均匀沉降，并对管片接缝采取密封措施；必要时应于管片环内侧加贴防护层，用以加强防水、降低糙率和防止空蚀，以满足设计期限内正常运用要求。

6.3 双层衬砌结构

6.3.1 根据界面结构的不同力学特性，双层衬砌结构可分为叠合式双层衬砌、复合式双层衬砌和分离式双层衬砌，应根据工程环境、工作特点、承载要求、地质条件选定。

6.3.2 对于河床冲淤变化明显的水底隧道、内外水压差较大或输水流速较高的有压隧道、围土对隧道产生偏压的隧道，宜选用双层衬砌结构。

6.3.3 当双层衬砌在界面设置传力垫层，以形成复合式结构或分离式结构时，为防止内衬转动，应以不影响内、外衬控制截面内力条件前提下，在拱底采取局部连接措施。

6.3.4 当输水隧道双层衬砌设计为叠合结构，应采取可靠的结构措施，以确保内衬与外衬结合为整体结构。

6.3.5 内衬结构缝防水应执行国家现行规范的规定，并考虑内水外渗对外衬受力造成不利影响。

6.3.6 对于内水压力较高的双层衬砌隧道，内衬宜采用后张预应力混凝土结构，通过张拉预埋于内衬中的预应力筋提供预应力；根据结构工作条件选用无台座张拉的环锚预应力体系或采用有台座张拉的群锚预应力体系，参见附录 E。

7 结构计算

7.1 基本规定

7.1.1 盾构法输水隧道结构计算由整体结构计算、横向结构计算和纵向结构计算三大部分组成：

1 整体结构计算应包括隧道各段的抗滑动、抗倾覆、抗浮稳定验算等。

2 横向结构计算应包括：隧道截面内力与变形计算，以及截面结构设计（含普通钢筋和预应力筋配筋、裂缝控制）等。

3 纵向结构计算内容应包括：输水隧道纵向沉降变形、管段伸缩、管段接缝张开度等计算；对于地基条件复杂或特殊洞段尚应包括纵向内力（或应力）、变形、强度、裂缝控制等计算项目；此外内衬预应力结构，应重视张拉分批、分序的研究工作，避免张拉施工过程因纵向拉应力超限引起环向裂缝。

7.1.2 输水隧道结构计算一般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；对于地质条件复杂的重要输水隧道，或与其它建筑物交叉、或双洞近距离并行、或设计烈度等于或大于 7 度的输水隧道等则应按地层结构模型进行分析计算。

7.1.3 软土地基上的输水隧道纵向地基沉降变形，一般可采用分层总和法或等效刚度弹性地基梁法进行计算，必要时应采用实体有限单元法进行对比分析；岩石地基上的输水隧道纵向变形可采用实体有限单元法进行纵向分析。

7.1.4 盾构法输水隧道应按施工、使用和检修阶段，分别进行结构的承载能力极限状态计算和正常使用极限状态验算，当计入地震荷载或其它偶然荷载时，可不验算结构的裂缝宽度。

7.1.5 遇下列情况时，应对隧道进行纵向结构分析：

- 1 荷载沿隧道纵向有较大变化时（如穿过游荡性明显的河床）；
- 2 隧道上方地形变化较大或地面有较大建、构筑物时；
- 3 地基或结构特性有显著差异时；

4 长距离盾构法输水隧道考虑地震作用时。

7.1.6 盾构法输水隧道结构的计算模型应根据地质条件、衬砌构造特点、施工工艺等确定，且应分别考虑施工及运行各阶段的荷载作用状态；宜考虑衬砌与地层共同作用及装配式衬砌接头的影响。

7.1.7 凡符合下列情况之一的盾构法输水隧道，宜在有代表性的隧道段布置原位安全监测：

- 1 重要的输水隧道；
- 2 地质条件复杂的进、出口隧道段或不良地质隧道段；
- 3 外水压力或内水压力较高的隧道段；
- 4 采用预应力内衬的隧道段；
- 5 地震设计烈度为 8、9 度的隧道。

7.2 单层衬砌结构设计计算

7.2.1 对于饱和软土地层中的单层衬砌结构，当按荷载结构模型采用结构力学方法进行横向结构计算时，可参见附录 D 所示的荷载分布，采用弹性均质圆环法、弹性铰圆环法以及弹性抗力法等多种方法进行。

7.2.2 采用弹性抗力法进行结构计算时，对于重大的输水隧道工程应通过试验测取弹性抗力系数，对于一般工程可按附录 C 初选后，再结合工程类比合理选用。

7.2.3 采用弹性铰法进行结构计算时，在计算模型中应结合管片接头构造，采用合适的接头模型，对于重大的输水隧道工程还宜对接头进行模型试验，检验接头结构的工作性能，测取接头刚度。

7.2.4 管片接缝允许变形量，应根据接缝防水要求确定。对于重大的输水隧道工程应进行管片接缝水压模型试验，按水压不小于设计水压 2 倍进行测试；对于有压输水隧道，应就防外水和防内水分别进行测试，以满足防水要求。

7.2.5 对于有纵向地基沉降变形问题的隧道，应进行环缝抗弯刚度、纵向螺栓传递能力，以及接缝张开度复核计算。

7.2.6 对于钢筋混凝土单层衬砌结构，当按荷载结构模型计算时，应就计算内力进行配筋设计；当按地层结构模型采用实体有限单元法计算时，应将按实体建模的衬砌结构各截面应力转换为截面内力，再进行配筋设计。

7.3 双层衬砌结构设计计算

7.3.1 双层衬砌结构的外层管片环即外衬，除应执行 7.2 节单层衬砌结构计算有关规定外，尚应执行本节有关外衬结构计算的规定。

7.3.2 对于分离式双层衬砌结构，其界面结构通常选用有足够厚度的弹性排水垫层，使其线刚度（指垫层弹性模量与其厚度的比值）满足内、外衬单独受力和排水要求；外衬仍可以其自重和外部水土压力为主要荷载；内衬则可按自由变形结构确定其计算模型，以其自重、内水压力为主要荷载。

7.3.3 复合式和叠合式双层衬砌结构，在内衬形成前，结构计算与单层衬砌结构类同；内衬形成后，按与外衬组成整体结构承担其后发生的全部荷载，具有联合受力的结构特性。

7.3.4 有关预应力内衬结构计算与设计方法参照《混凝土结构设计规范》（GB 50010）有关规定进行。

7.3.5 为方便预应力施工，并减小对内衬的削弱，宜选用环锚锚具及其配套器具；预应力筋材料宜采用钢绞线；为张拉预应力筋所设置的预留槽，应左右间隔布置于隧道轴线的两侧，通过相互补偿，使预应力效果趋于均匀（参见附录 E）。

7.3.6 对于后张有粘结预应力筋，为减小与孔道之间的摩阻损失，对孔道应采取包括线型控制、接头防漏、防堵、内壁清理与电视复查等措施；必要时可对预应力筋涂抹石墨粉，但涂抹石墨粉用量应通过生产性试验，以预应力筋与孔道灌浆体之间的锚固力不受涂抹石墨粉影响而定。

7.3.7 对于后张无粘结预应力筋，应按现行《无粘结预应力混凝土结构技术规程》（JGJ92）中对防腐油脂各项指标检测，并按规程要求配置足量的非预应力筋。

7.3.8 后张预应力筋张拉控制采用双控，即应力控制（又称张拉力控制）和伸长控制：

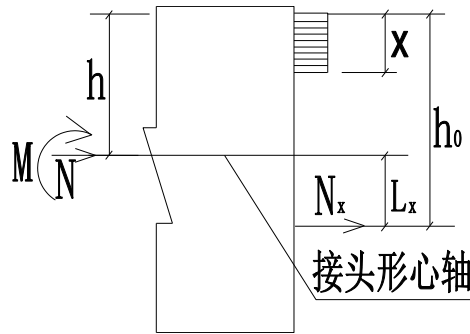
1 应力控制：工作锚板处的张拉控制应力宜取 0.7 倍～0.75 倍的标准强度，未经论证不应超过 0.75 倍标准强度；

2 伸长控制：按设计孔道摩阻系数，计算预应力筋在控制张拉力下的弹性伸长值作为伸长控制值，要求实测弹性伸长值（应扣除预应力筋锚固过程的回缩值）应不小于伸长控制值。

7.4 衬砌接头计算

7.4.1 采用单排螺栓连接的衬砌接头应按下式进行接头承载力验算：

1 正弯矩（内拉）：

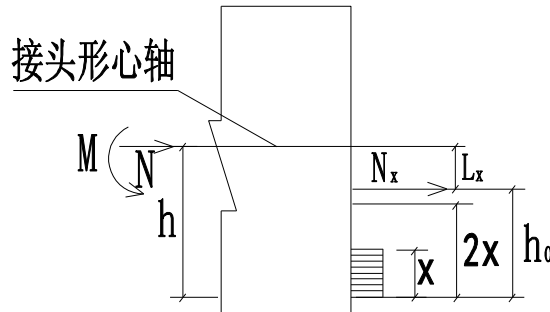


对接头形心轴取矩得：

$$Mu = \alpha_1 f_c b x \left(h - \frac{x}{2} \right) + N_x l_x \geq \gamma_Z M$$

$$\alpha_1 f_c b x - N_x = \gamma_Z N$$

2 负弯矩（外拉）：



对接头形心轴取矩得：

$$Mu = \alpha_1 f_c b x \left(h - \frac{x}{2} \right) - N_x l_x \geq \gamma_Z M$$

$$\alpha_1 f_c b x - N_x = \gamma_z N$$

式中： M —— 荷载效应组合接头弯矩设计值；

N —— 荷载效应组合接头轴力设计值（压力为正）；

γ_z —— 重要性系数；

M_u —— 接头弯矩承载力设计值；

x —— 接头截面混凝土受压区应力折算为矩形均布应力的分布高度；

h —— 接头形心轴至受压区边缘距离；

L_x —— 内侧螺栓中心至接头形心轴距离；

h_0 —— 接头截面有效高度；

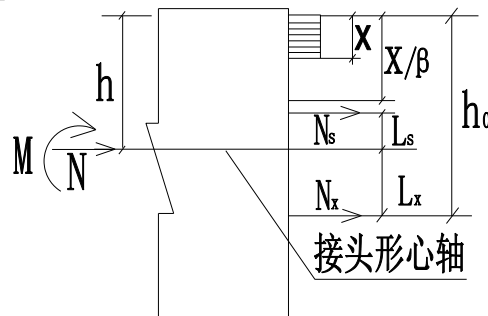
N_x —— 内侧螺栓拉力，当为拉力均取承载力设计值，若为压力时则不考虑其作用；

α_1 —— 受压区混凝土应力图形简化为等效矩形应力图系数，当混凝土强度等级不超过C50时取 0.80，当混凝土强度等级为C80时取 0.74，其间按线性内插法确定；

f_c —— 混凝土抗压强度设计值。

7.4.2 采用双排螺栓连接的衬砌接头应按下式进行接头承载力验算：

1 正弯矩（内拉）：



对接头形心轴取矩得：

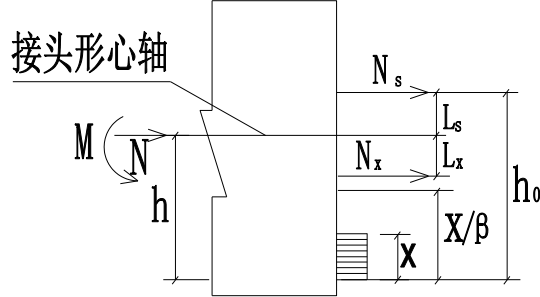
$$M_u = \alpha_1 f_c b x \left(h - \frac{x}{2} \right) - N_s l_s + N_x l_x \geq \gamma_z M$$

$$\alpha_1 f_c b x - N_s - N_x = \gamma_z N$$

$$N_s = \frac{h - L_s - \frac{x}{\beta}}{h_0 - \frac{x}{\beta}} N_x$$

图中 N_s 按不位于受压区画出，若 N_s 位于受压区，则不考虑 N_s 作用；

2 负弯矩（外拉）：



对接头形心轴取矩得：

$$Mu = \alpha_1 f_c b x \left(h - \frac{x}{2} \right) - N_x l_x + N_s l_s \geq \gamma_z M$$

$$\alpha_1 f_c b x - N_s - N_x = \gamma_z N$$

$$N_x = \frac{h - L_x - \frac{x}{\beta}}{h_0 - \frac{x}{\beta}} N_s$$

图中 N_x 按不位于受压区画出，若 N_x 位于受压区，则不考虑 N_x 作用；

式中： β —— 受压区高度调整系数，当混凝土强度不超过C50 时取 0.8，当混凝土强度为C80 时取 0.74，期间按线性内插法确定；

L_s —— 外侧螺栓中心至接头形心轴距离；

N_s —— 外侧螺栓拉力，当为拉力均取承载力设计值，若为压力时则不考虑其作用；

其它符号意义同 7.4.1。

7.5 整体稳定验算

7.5.1 抗浮稳定验算

隧道结构在施工和使用阶段应对抗浮条件较不利的洞段，按单位长度采用下列公式进行抗浮验算：

$$F_f \leq W_s + W_a \quad F_f = \gamma_b \gamma_w V$$

式中： F_f —— 浮力设计值(kN/m)；

γ_w —— 水的重度 (kN/m³)，可按 10kN/m³ 采用；

V —— 隧道结构排开水的体积 (m³/m)；

γ_b —— 浮力作用分项系数，施工阶段取 1.1，使用阶段取 1.2；

W_s —— 隧道结构自重标准值 (kN/m)；

W_a —— 隧道上覆土层和荷重有效压重标准值 (kN/m)；在洞外水位以上土层和荷重取天然重度计算，在洞外水位以下取浮重度计算。

7.5.2 抗滑动稳定与抗倾覆稳定验算.

盾构法输水隧道岸坡式、岸塔式进水口和出水口，以及明洞段应按《水利水电工程进水口设计规范》SL285 要求，验算抗滑动稳定与抗倾覆稳定。

8 衬砌构造规定

8.1 单层衬砌构造规定

8.1.1 组成单层衬砌的管片体形应综合考虑隧道线路特点和施工技术条件而定。对于线形简单，平曲线和竖曲线较少的线路，并且盾构具备自动纠偏能力，宜选用通用型双面楔形管片或通用型单面楔形管片。

8.1.2 单层衬砌中管片环的宽度应与盾构拼装设备的举重能力、千斤顶行程与其设备余量、拼装方式和拼装施工所需初始间隙等条件相适应。

8.1.3 为提高接缝的抗剪能力，并满足拼装定位需要，在管片的环缝面上宜设置凹凸榫槽，向着千斤顶的一面（即朝着盾构前进方向）为凸榫，可直接承受千斤顶撑靴的推力，背向千斤顶的一面为凹槽，同时布置纵向连接螺栓，共同承载和约束可能发生的纵向变形。管片纵缝面一般不用设置凹凸榫，但为适应施工技术条件，使管片环尽早封闭成环，减小错台，封闭块与邻接块相接的缝面亦可设置凹凸榫槽，其中封闭块管片纵缝面设凸榫，与其相接的邻接块纵缝面设置凹槽。

8.1.4 为实现良好受力与精确拼装，管片制作和拼装应执行《盾构法隧道施工与验收规范》（GB50446）有关规定：日生产每 15 环应抽取 1 块管片进行检验，管片允许偏差和检验方法应达到表 8.1.4-1 规定；每生产 200 环管片应进行 1 次水平拼装检验，管片水平拼装检验允许偏差和检验方法应达到表 8.1.4-2 规定：

表 8.1.4-1 管片允许偏差和检验方法

项目	允许偏差（mm）	检验工具	检验数位
宽度	±1	卡尺	3 点
弧、弦长	±1	样板、塞尺	3 点
厚度	+3， -1	钢卷尺	3 点

表 8.1.4-2 管片水平拼装检验允许偏差和检验方法

项目	允许偏差（mm）	检验频率	检验工具
环向缝间隙	2	每缝测 6 点	塞尺
纵向缝间隙	2	每缝测 2 点	塞尺
成环后内径	±2	测 4 条（不放衬垫）	钢卷尺

成环后外径	+6, -2	测 4 条 (不放衬垫)	钢卷尺
-------	--------	--------------	-----

8.1.5 对封闭块采取的拼装方式应视拟用盾构机设备和施工技术条件对径向直接顶入型、纵向直接插入型和纵向搭接径向顶入型进行比较后确定。

8.1.6 为防止管片拼装过程发生破损, 并方便拼装施工, 对管片接缝应采取如下构造措施:

1 在密封垫止水槽以外的两侧缝面各削去 1 mm~2mm, 拼装后共形成 2mm~4mm 的缝隙, 必要时, 在管片接缝外缘加贴海绵橡胶带。

2 自接缝内侧角缘与密封垫之间的缝面上加贴 1~2 mm 厚的丁晴软木橡胶垫片。

3 若邻接块与封闭块纵缝面未设置凹凸榫槽时, 为了让封闭块拼装就位后与邻接块缝面及时贴合, 使管片环尽早自锁成环, 亦可在封闭块与邻接块纵缝面, 增设由扁钢制备的管片拼装限位销。

4 管片承接千斤顶撑靴的顶面及角缘等薄弱部位宜设置钢筋网等构造钢筋。

5 必要时亦可在缝面设置定位销, 以方便管片拼装过程接缝对位。

8.1.7 管片上应预留二次注浆孔, 并设置不出内弧面的钢制闷头。

8.2 双层衬砌构造规定

8.2.1 双层衬砌结构的外衬除应执行单层衬砌结构有关构造规定外, 尚应执行本节有关构造规定。

8.2.2 双层衬砌内衬结构受温度变化、混凝土干缩和纵向不均匀沉降作用时, 应设置环向贯通型结构缝 (简称环缝), 缝内设止水; 环缝间距应根据温度荷载、地质条件和围土 (岩) 性状, 以及距离盾构始发竖井或到达竖井远近而定, 且宜为管片宽度的倍数。

8.2.3 对于与工作竖井邻接的洞段, 以及地层性状有突变的洞段, 内衬环缝应按管片宽度的倍数加密。

8.2.4 内衬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《混凝土结构设计规范》(GB 50010) 有关规定。

8.2.5 当输水隧道按分离式和复合式双层衬砌结构设计时，通常在内衬与外衬的界面上须敷设弹性排水垫层，必要时垫层外侧增配防水膜，用以防止洞内压力水渗漏至界面后，再通过管片接缝外渗到围土中。垫层应该力求表面平顺、平整、牢固、无气囊、无破损、不鼓包、不下垂、接长不留空隙；同时应配套完善的排放界面渗漏水措施，包括：

- 1 在内衬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。

8.2.6 当输水隧道按叠合式双层衬砌设计时，为增强内衬与外衬联合受力性能，应采取如下构造措施，以确保内衬与外衬结合为整体结构：

- 1 外衬（含手孔）的内表面均应充分凿毛。
- 2 预埋在管片的插筋应满足锚固长度要求，必要时可设直弯钩，当在手孔内布置插筋时，插筋宜与连接螺栓焊牢；伸入内衬的插筋直线段长不宜小于 10 倍插筋直径，为满足锚固长度要求，亦可设直弯钩；当采用带有内螺纹的接驳器预埋在管片时，接驳器应满足自身锚固要求，在外衬管片环就位后、内衬混凝土浇筑前将带螺纹的插筋旋入接驳器。
- 3 回填手孔的混凝土强度等级应与内衬混凝土等强。对于腰线以上手孔应采用快硬微膨胀混凝土回填，腰线以下手孔可与内衬一起现浇混凝土。

8.2.7 后张有粘结预应力器材与安装应满足下列要求：

- 1 器材检测：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，并对预应力筋抽样进行原材物理力学性能测试；并要求将预应力筋与锚具的组装件进行静载组装件锚固性能试验；以上检测指标均应达到相关技术标准。
- 2 预应力筋编束组装：对预应力筋应采用砂轮切割机按设计长度下料，

并按设计要求编束组装。

3 预留槽布置：预留槽长、宽及深度应满足张拉机具对锚具组装件的张拉要求，在预应力筋安装前，应对预留槽周壁及底板凿毛；浇筑内衬混凝土过程，预留槽应开口于模板之外，以便施工期间可随时对孔道检查和清理淤积物，以防堵塞和污染孔道。

4 孔道布置：孔道应架立在设计要求的同一环向平面内，孔道的大弧段（即图E.1.2 的第 2 圆弧段）宜利用内衬外层钢筋架立，弯入预留槽的小弧段（即图E.1.2 的第 1 圆弧段）宜采用样架钢筋定位架立。在孔道安装前、后应清除孔内淤积物，必要时应进行孔道电视检查。

5 预埋件安装允许误差：孔道、喇叭管等预埋件安装应避免与受力钢筋、结构缝止水发生矛盾，喇叭管安装应严格控制其中心线位置。预留槽与预埋件安装允许误差见表 8.2.7。

表 8.2.7 预留槽与预埋件安装允许误差表

序号	偏差名称		允许偏差（mm）
1	预留槽	中心线位置	10
2		截面尺寸	10
3	喇叭管口中心线相对预留槽位置		3
4	波纹管中心线位置		5

6 预应力筋就位：内衬混凝土浇筑前，宜在孔道内放入一根可供牵引的钢丝，在混凝土施工过程，可供随时检查孔道的通畅性；在预应力筋就位前，在对孔道清理后，将预应力筋前端套上穿束导向帽，并与牵引钢丝相连，采用机械或人工将预应力筋牵入孔道就位。

8.2.8 后张无粘结预应力筋在器材检测、安装、张拉、控制等均与后张有粘结预应力要求相同，除此尚应满足下列要求：

1 按现行《无粘结预应力混凝土结构技术规程》（JGJ92），补充必要的检测，并满足有关技术要求；

① 对预应力筋—锚具组装件进行动载锚固性能试验；

② 对预应力筋—锚具组装件进行疲劳锚固性能试验；

③ 对包裹预应力筋的油脂防腐性能进行检测。

2 对裸露于预留槽的预应力筋和锚具，在封填预留槽前，采取防腐措施。

8.2.9 后张预应力筋张拉与控制：

1 张拉控制：采用双控，除张拉力控制外，同时对弹性伸长进行控制。

2 单根预紧：在对预应力筋整束张拉前，应对其中的每根预应力筋逐根预紧，单根预紧力不宜超过控制拉力的 25%。

3 张拉分批：预应力筋张拉过程在产生环向预压应力的同时，对衬砌还将产生纵向拉应力，应通过合理分批的张拉方案，防止纵向拉应力超限，而避免为此采取纵向预应力措施。

4 张拉分序：分批张拉方案确定后，每束预应力筋宜分两序张拉，每序张拉力应以避免内衬纵向拉应力超限而定，通常第一序拉到设计张拉力的 60%~70%，第二序再拉到设计张拉力；每序张拉结束后，均须仔细查看有无裂缝，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。

8.2.10 预应力筋张拉完毕应及时回填预留槽。在此之前，应对槽壁凿毛，必要时沿槽壁采取密封措施；对于有粘结预应力系统应尽快对孔道采取真空灌浆；对于无粘结预应力系统，应对外露于预留槽内的预应力筋和锚具采取可靠的防腐措施。

9 防水设计

9.1 一般规定

9.1.1 隧道的防水设计，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、耐久性和使用要求。

9.1.2 隧道防水等级宜根据工程的重要性、设计使用年限等要求，按现行国家标准《地下工程防水技术规范》(GB50108)选用不小于三级的防水标准。

三级防水标准应符合以下规定：

1 有少量漏水点，不得有线流和漏泥砂；

2 任意 100 m² 防水面积上的漏水或湿渍点数不超过 7 处，单个漏水点最大漏水量不应大于 2.5L/d，单个湿渍的最大面积不大于 0.3 m²。

9.1.3 隧道结构防水混凝土的抗渗等级应根据所承受的水头、水力梯度以及排水条件、水质条件和渗水的危害程度，并按不低于表 3.4.6 的规定值设定。

9.1.4 工程采用的防水混凝土、水泥砂浆防水层、涂料防水层、管片接缝橡胶密封垫、螺孔橡胶圈、橡胶止水带等材料特性应符合现行国家标准《地下工程防水技术规范》(GB50108)、《地下防水工程质量验收规范》(GB50208) 的规定（参见附录F）。

9.2 单层衬砌防水设计

9.2.1 单层衬砌防水措施应包括：管片本体防水、管片接缝防水和螺栓孔防水等多项防水，以满足隧洞安全运行要求。

9.2.2 管片接缝防水：

1 密封垫防水宜靠近外缘布置，止水的性能应通过模拟接缝拼装型式，通过水密性试验验证。

2 试验技术要求为：在 2 倍最大内水压和外水压分别作用下，接缝在允许张开量下不产生渗漏；对于内水压力较高或重大输水隧道，必要时，可在靠近内缘处增设一道防水密封垫。密封垫构造形式、截面尺寸和材料性能

应符合设计要求,批量出厂前应通过水压试验抽查,施工时应严格控制质量。

3 对于埋深变化较大的长大隧道,在确定了密封垫断面外形尺寸后,可按水压条件的变化,分段对防水布置或防水材质性能作相应调整。

4 拼装施工时,封闭块两侧缝面宜使用减摩剂,以避免纵向插入损坏缝面防水材料,若发现有损坏,轻则就地修补,重则拆下重新调换、粘贴,以确保管片接缝密封防水性能。

5 对通缝拼装的十字缝和错缝拼装的T字缝,在接缝两侧的管片角隅处宜加贴自粘性橡胶薄片,以提高防水效果。

6 嵌缝密封材料应具有足够的变形能力,并与混凝土有良好的粘结性能,并对饮用水隧道

9.2.3 螺栓孔防水:采用防水材料垫圈,套于螺栓,覆盖螺孔上,依靠紧固螺栓达到防止螺孔渗漏目的;必要时对螺栓孔采取灌浆处理措施。

9.2.4 遇到有腐蚀性地层或经检测混凝土的氯离子扩散系数未达到设计要求的管片,其背侧和密封垫外侧的环、纵缝面应涂抹防水涂层。涂层宜为环氧和改性环氧涂料等封闭型、水泥基渗透性结晶型或硅氧烷类等渗透型材料。

9.2.5 管片环与工作井的永久接缝防水宜设置刚柔结合的大变形缝,以防止不均匀沉降对防水措施造成不良影响。

9.3 双层衬砌防水设计

9.3.1 双层衬砌结构除应执行单层衬砌有关防水规定外,尚应执行以下有关防水规定。

9.3.2 内衬结构缝由外向里,顺序布置橡胶止水带或紫铜止水片、遇水膨胀橡胶止水条,并视防水效果采用聚脲或聚硫密封胶封口。

9.3.3 紫铜止水片应按设计要求成型,采用焊接方法接长;在先浇段安装时,必须正确埋设,固定牢靠,以防浇筑时偏移或变形。

9.3.4 填缝板应双面满涂沥青粘贴在先浇段结构缝缝面上,防止施工期间脱落或鼓起;遇水膨胀橡胶止水条应采用热接法粘合;内衬结构缝可根据工程条件采用聚脲或聚硫密封膏封口,施工前应合理选用专用工具,并对接缝

面进行清洗，以保证封口施工质量。

9.3.5 对内衬结构缝的止水性能应采用加压检查，当检查发现结构缝有渗漏时，应及时进行处理。

10 抗震设计

10.1 一般规定

10.1.1 盾构法输水隧道可按照功能形式划分为标准设防类（丙类）和重点设防类（乙类）等抗震设防类别。

10.1.2 盾构法输水隧道抗震设防标准按下列规定确定：

1 丙类盾构法输水隧道应按本地区抗震设防烈度确定其抗震措施和地震作用；

2 乙类盾构法输水隧道应按高于本地区抗震设防烈度一度的要求加强其抗震措施，并按本地区抗震设防烈度确定其地震作用。

10.1.3 地震基本烈度按现行国家标准《中国地震动参数区划图》GB 18306 规定的本地区抗震设防要求确定。

10.1.4 重点设防类（乙类）的盾构法输水隧道的抗震设防性能要求应按照表 10.1.4 确定。

表 10.1.4 盾构法输水隧道抗震设防性能要求

地震作用	部件		性能要求	受力状态
设计地震	衬砌	主体衬砌	无损伤	弹性
		附属构件		
	接头	凹凸榫		
		手孔		
		螺栓		
罕遇地震	衬砌	主体衬砌	无损伤	弹性
		附属构件	可修复	局部塑形
	接头	凹凸榫	无损伤	弹性
		手孔	无损伤	弹性
		螺栓	无损伤	弹性

10.1.5 设计烈度为 6 度或时限短暂的施工工况，可不进行抗震计算，但对于重点设防类盾构法输水隧道应采取适当的抗震措施。

10.1.6 设计烈度 7 度和大于 7 度的输水隧道均应按现行《水工建筑物抗震设计规范》（SL 203）验算进水口、出水口和砂性地层埋藏较浅的洞身段抗震强度和稳定性。

10.1.7 设计烈度 8 度和大于 8 度的输水隧道均应考虑竖向地震作用。

10.1.8 水平向设计地震加速度 a_h 与抗震设防烈度的关系应该符合表 10.1.5 的取值，竖向设计地震加速度 a_v 按水平向设计地震加速度 a_h 的三分之二取值。

表 10.1.8 水平向地震加速度代表值

设计烈度	7	8	9
a_h	0.1g	0.2g	0.4g
注：g为重力加速度， $g=9.81\text{m/s}^2$ 。			

10.1.9 对于乙类及以上重大输水隧道，当设计烈度为 8、9 度时，应提出强震观测设计。

10.2 地震反应计算

10.2.1 盾构法输水隧道地震反应计算，可以采用下列方法

- 1 等代地震荷载法
- 2 反应位移法
- 3 地层-结构时程分析法。

10.2.2 丙类盾构法输水隧道进行抗震计算时，可采用等代地震荷载法；乙类以上重大输水隧道应采用反应位移法或动力时程分析法进行抗震计算。

10.2.3 反应位移法适用于隧道衬砌结构横向地震反应计算以及隧道纵向地震反应计算。采用这类方法时，地层动力反应位移最大值被作为强制位移加在结构上。

10.2.4 当采用时程分析法时，应对结构与地基、结构与水体之间的动力相互作用进行合理的建模处理。并对土体的边界进行合理建模，侧面人工边界不宜小于 3 倍结构水平有效宽度。选用不少于两组的实际强震记录和一组地震安全性评价提供的加速度时程曲线，按有限单元法进行抗震计算。

10.2.5 采用时程分析法进行有限元数值计算，考虑复杂节点计算时，应采用三维实体计算模型建模。可以采用多尺度建模方法对计算模型进行简化。

10.2.6 对于横向构造沿隧道轴向均匀不变的隧道，一般可以按平面应变问题进行水平地震作用计算，以下情况需按空间结构模型进行反应分析：

- 1 纵轴方向结构形式有较大变化。

2 结构纵向土层分布有显著差异。

3 隧道与泵站、隧道与工作井等复杂节点位置处。

10.2.7 纵向计算宜采用三维模型进行计算，隧道衬砌可采用简化梁单元建模，结构与土体之间相互作用可用地基弹簧模拟。

10.2.8 单层衬砌和分离式衬砌外衬均为拼装式管片环，当作为整体结构进行抗震结构计算时，可通过工程类比和敏感性分析对弹性模量适当折减后确定结构刚度，再进行抗震计算。

10.2.9 对于叠合式双层衬砌结构，外衬与内衬可作为整体结构，对弹性模量可按设计值取用后计算结构刚度，再进行抗震计算。

10.3 衬砌抗震设计

10.3.1 当采用动力法计算地震作用效应，进行承载力抗震验算时，应对地震作用效应进行折减，折减系数可取 0.35。（水工建筑物抗震设计规范 SL 203）

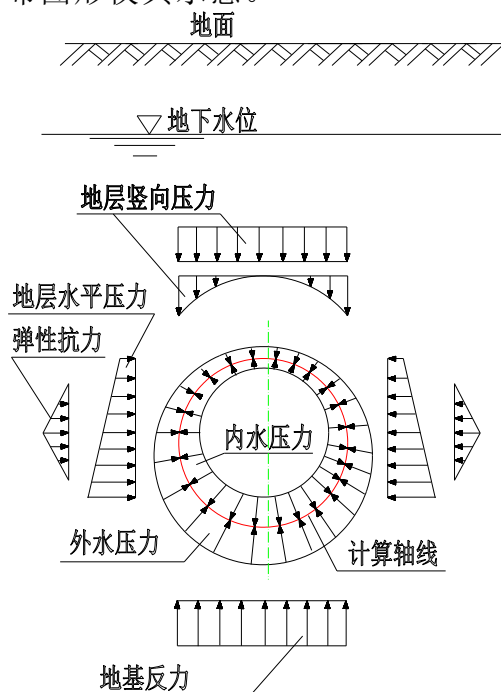
10.3.2 隧道进水口、出水口宜避开活动断裂和浅薄山嘴，设计烈度为 8、9 度时，宜选用埋深大的线路；在隧道的转弯段、分岔段、断面尺寸或地层突变的洞段应加密结构缝，以满足结构震要求。

10.3.3 对于地层突变的洞段，应加强纵向钢筋布置，直径不宜小于 14mm，并宜采用焊接接头或采用接驳器接长钢筋。

10.3.4 隧道建筑范围内有发震断裂时，应考虑断裂错动对隧道影响。结构宜采用柔性接头设计。

附录A 荷载结构模型荷载分布

A.0.1 处于饱水软土地层中的单层圆形衬砌结构，当采用荷载结构模型按水土分算时，主要荷载分布见图A.1。该图只示出地层竖向压力、地层水平压力、外水压力、内水压力、弹性抗力、地基反力的分布图式，其它荷载未示。图中内水压力按有压输水给出；对于无压输水，内水压力应按自由水面线计算；弹性抗力分布图形仅具示意。



图A.0.1 荷载结构模型水土分算主要荷载简图

（适用于饱水软土地层单层圆形衬砌）

A.0.2 分离式双层衬砌主要荷载分布

1 处于饱水软土地层中的分离式双层衬砌，外衬主要荷载分布与单层衬砌类同，参见图A.1，但无内水压力作用；

2 内衬主要荷载为内水压力，其它相关荷载参见第5章荷载分类与组合。

A.0.3 复合式双层衬砌和叠合式双层衬砌主要荷载分布

1 施工期外衬主要荷载分布与分离式双层衬砌外衬相同。

2 运行期内、外衬结构共同承担其后全部荷载，计算荷载按作用在整体结构上考虑，内衬与外衬分载比例取决于界面结构。

附录B 荷载分项系数

B.0.1 承载力极限状态荷载分项系数按表B.0.1取用：

表B.0.1 承载力极限状态设计荷载组合分项系数

荷载组合	基本荷载组合		特殊荷载组合		偶然荷载组合		
设计荷载组合 分项系数	γ_{0i}	γ_{1j}	γ_{0i}	γ_{1j}	γ_{0i}	γ_{1j}	γ_2
分项系数取值	1.0~ 1.35	1.40	1.0~ 1.25	1.30	1.0~ 1.15	1.20	1.05

B.0.2 表B.0.1中基本荷载分项系数取值

- 1 当永久荷载对结构有利时，永久荷载分项系数 γ_{0i} 取 1.0；
- 2 当永久荷载对结构不利时，对于由永久荷载控制的组合，永久荷载分项系数 γ_{0i} 取 1.35，由可变荷载控制的组合，永久荷载分项系数 γ_{0i} 取 1.2。

B.0.3 特殊荷载分项系数取值

- 1 当永久荷载对结构有利时，永久荷载分项系数 γ_{0i} 取 1.0；
- 2 当永久荷载对结构不利时，对于由可变荷载控制的组合，永久荷载分项系数 γ_{0i} 取 1.15，对于由永久荷载控制的组合，永久荷载分项系数 γ_{0i} 取 1.25。

B.0.4 偶然荷载分项系数取值

- 1 当永久荷载对结构有利时，永久荷载分项系数 γ_{0i} 取 1.0；
- 2 当永久荷载对结构不利时，永久荷载分项系数 γ_{0i} 取 1.15。

附录C 地层地质特征及物理力学参数参考表

地层			重 度 γ (kN/m^3)	内 摩 擦 角 $\phi(^{\circ})$	弹性抗力系数k ($\times 10^6 \text{kN/m}^3$)		地 层 与 衬 砌 摩 擦 系 数 μ	泊 松 比 γ
地层名称	地质特征	坚 固 性 系数f			侧面	底部		
很坚硬的花岗岩和石英岩， 最坚硬的砂岩和石灰岩等	坚硬密实稳固无裂隙和 未风化的岩层	≥ 15	26~30	——	——	——	——	——
坚硬的石灰岩和砂岩、大理 岩、白云岩、黄铁矿，不坚 硬的花岗岩	坚硬密实稳固岩层有很 小裂缝	≥ 8	25	80	1.2 ~ 2.0	1.5 ~ 2.5	0.4 ~ 0.5	0.1 ~ 0.2
普通砂岩，铁矿	相当坚硬、密实、稍有风 化的岩层	6	24~25	75	0.8 ~ 1.2	1.0 ~ 1.5	0.4 ~ 0.5	0.1 ~ 0.2
砂质片岩，片岩状砂岩	较坚硬，密实且稍有风化 的岩层	5	24~25	72.5	0.6 ~ 0.8	0.7 ~ 1.0	0.4 ~ 0.5	0.1 ~ 0.2
坚硬的粘板岩，不坚硬的石 灰岩和砂岩、软砾岩	较坚硬的、已受风化的、 可能沿着成层面和沿着 节理脱落的岩层	4	25~28	70	0.4 ~ 0.6	0.5 ~ 0.75	0.3 ~ 0.4	0.2 ~ 0.3

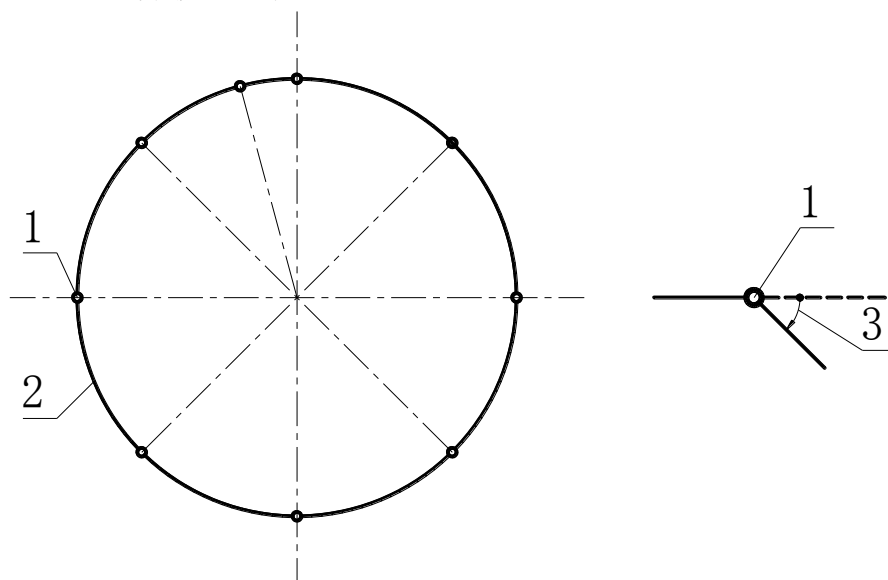
不坚硬的片岩，密实的泥灰岩， 坚硬胶结的粘土	中等坚硬的岩层	3	25	70	0.3 ~ 0.4	0.4 ~ 0.5	0.3 ~ 0.4	0.2 ~ 0.3
软片岩，软石灰岩，冻结土， 普通泥灰岩，破碎砂岩和胶结的卵石	较软的岩层	2	24	65	0.2 ~ 0.3	0.25 ~ 0.40	0.3 ~ 0.4	0.2 ~ 0.3
碎石土壤，破碎片岩，硬化粘土，硬煤，粘结的卵石和碎石	较软或破碎的地层	1.5	18~20	60	0.12 ~ 0.20	0.15 ~ 0.25	0.2 ~ 0.3	0.3 ~ 0.4
密实粘土，坚硬的冲积土，粘土质土壤，掺石土，普通煤	软的或破碎的地层	1	18	45	0.06 ~ 0.12	0.08 ~ 0.15	0.2 ~ 0.3	0.3 ~ 0.4
湿沙，粘沙土，种植土，泥炭，轻型粘土	颗粒状的和松软的地层	0.6	15~16	30	0.03 ~ 0.0	0.04 ~ 0.08	0.2 ~ 0.3	0.3 ~ 0.4

附录D 单层衬砌荷载结构模型计算

盾构法输水隧道单层衬砌当采用荷载结构模型计算时，应符合下列规定：

D.1 通缝拼装衬砌按荷载结构模型计算

通缝拼装单层衬砌结构计算可取单环按弹性均质圆环法（惯用法）或弹性铰圆环法计算，其中弹性均质圆环法计算简图和荷载分布参见附录A.1，弹性铰圆环法计算模型参见图D.1.1；



图D.1.1 弹性铰圆环法计算模型

图中：1—环向接头回转弹簧；2—管片本体；3—环向接头转角

弹性铰圆环所承受的荷载与弹性均质圆环相同，衬砌结构接头所承受的弯矩 M 按下列公式确定：

当接头为正弯矩时 $M>0$ 时， $M=K_1'\theta$

当接头为负弯矩时 $M<0$ 时， $M=K_1''\theta$

式中： M —— 衬砌结构接头所承受的弯矩（ $\text{kN}\cdot\text{m}$ ），以内侧受拉为正，外侧受拉为负；

θ —— 接头转角（ rad ）；

K_1' 、 K_1'' —— 分别为抵抗正弯矩和抵抗负弯矩的接头回转弹簧刚度，
简称接头刚度 (kN·m/rad)。

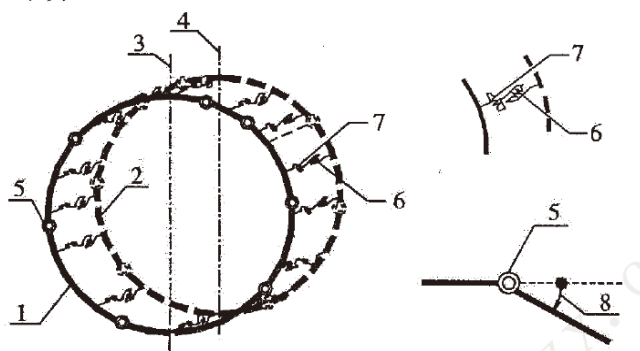
式中

D.2 错缝拼装衬砌荷载结构模型计算

$$q = \frac{W}{T \cdot L} \times 1000 \quad (\text{D.0.1})$$

式中： q —实测渗水量 (L/min km)；
 W —恒压时间内补入管道的水量 (L)；
 T —从开始计时至恒压结束的时间 (min)；
 L —试验管段的长度 (m)。

D.2.1 错缝拼装的单层衬砌结构宜按环间纵向传递模型（修正惯用法）或梁-弹簧模型进行计算。



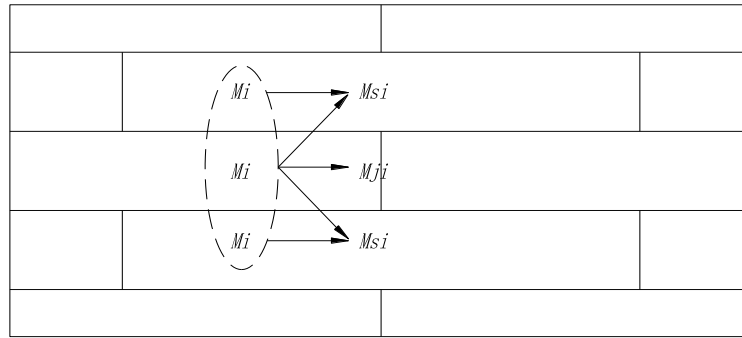
图D.2.1 梁-弹簧模型

图中：1、2—管片本体；3、4—相邻管片环断面中轴线；5—环向接头回转弹簧；6、7—纵向弹簧；8—环向接头转角。

D.2.2 错缝拼装计算要点

1 盾构法输水隧道单层衬砌接头刚度、衬砌刚度折减系数 η 及纵向传递系数 ξ 应选用符合实际的参数，宜根据管片直接接头试验或接头部位夹片试验，并结合工程类比确定；

2 错缝拼装时，弯矩的纵向传递模型计算简图见图D.2.2。



图D. 2. 2 错缝拼装弯矩纵向传递简图

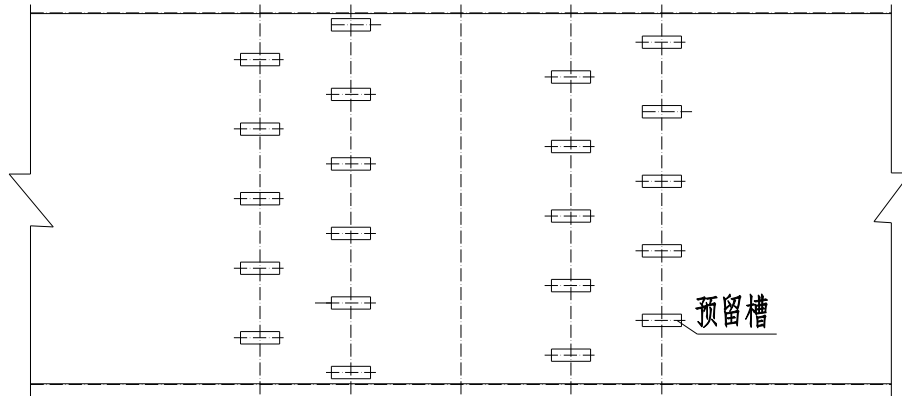
3 错缝拼装单层衬砌环在接头处的内力和接头位置对应的相邻管片截面内力可基于匀质圆环模型的计算弯矩和轴力，在考虑调整系数($\xi=0.2\sim0.4$)后得到。调整系数 ξ 取值可根据环间的摩擦、纵向螺栓或环缝面上的凹凸榫槽的剪切力作用情况确定。

附录E 环锚预应力

E.1 环锚预应力筋布置

E.1.1 环锚预应力筋张拉端布置

环锚预应力筋（以下简称预应力筋，通常由多股钢绞线集束组成）张拉端在内衬结构中通常以隧道中轴线左右对称相间布置，以取得比较均匀的预应力效果。图E. 1. 1 中预留槽为张拉端和被拉端所在位置（因为两端均连接在同一块的工作锚板上）。该图按左右各 2 列预应力筋张拉端纵向相间布置示出（也有按左右各 1 列相间布置的实例，均按工程设计要求而定）。

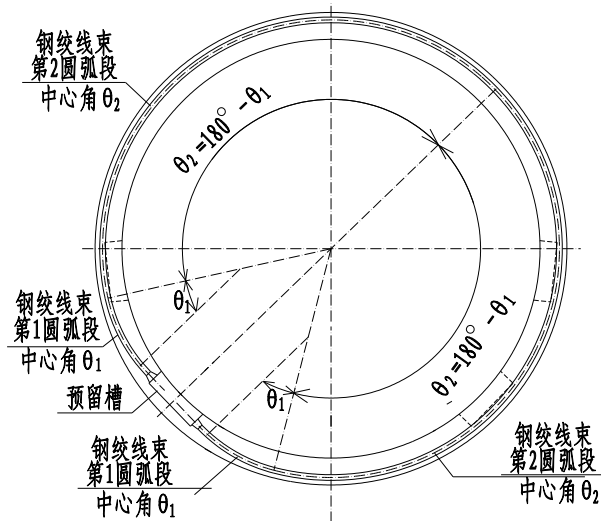


图E. 1. 1 预应力筋（每槽一束）纵向布置示意图

（从拱顶截面切开后展开）

E.1.2 环锚预应力筋环向立面布置

图E. 1. 2 为 1 束预应力筋（又称钢绞线束）环向立面布置的示意图（预留槽中连接预应力筋两端的工作锚板图中未示出）。



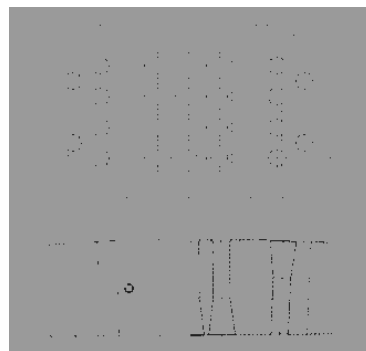
图E. 1. 2 钢绞线束横向布置示意图

(图中虚线为未切到的预留槽轮廓线)

E. 2 环锚锚具

E.2.1 工作锚板

图E. 2. 1 以 12 根钢绞线集束的预应力筋所用工作锚板为例示出环锚预应力的工作锚板。如图工作锚板中间锚孔供预应力筋张拉端套入，两侧孔供被拉端等分的两小束分别套入锚板。预应力筋张拉过程工作锚板布置参见图 E. 21。



图E. 2. 1 环锚工作锚板示意图

(工作锚板的孔数为偶数，由设计选用)

E.2.2 工具锚板

为一般的圆形群锚锚板，用于将顺序穿过工作锚板、弧形垫座、套筒、

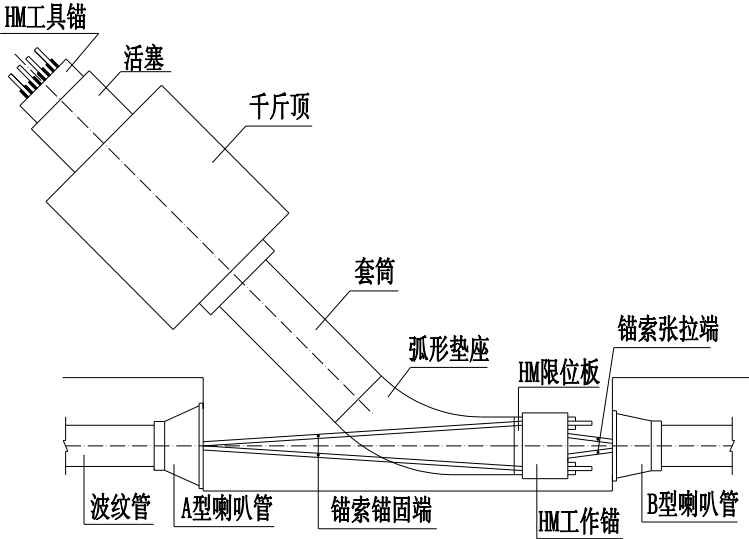
千斤顶穿心孔的供主拉的预应力筋锚于千斤顶活塞端部。工具锚板孔数与工作锚板的中间孔数相同。预应力筋张拉过程工具锚板布置参见图E.3 1。

E.2.3 弧形垫座

弧形垫座为辅助器具，用于将预应力筋弯出预留槽，使千斤顶得以在隧道内张拉。预应力筋张拉过程，弧形垫座布置参见图E.3.1。弧形垫座只有中间孔道，且无需安装夹片，其孔数与工作锚板的中间孔道数相同。

E.3 环锚组装图

图E.3.1 为环锚张拉组装图。



图E.3.1 环锚张拉组装图

E.4 环锚张拉与控制

E.4.1 环锚张拉

1 预紧：预应力筋张拉前处于松弛状态，初始长度不尽相同，须通过对单根预应力筋预紧，以使整束预应力筋张拉时初始长度和拉应力趋于相同。

2 分批、分序：预应力筋张拉过程在产生环向预压应力的同时，将对衬砌产生纵向拉应力。一般情况下只需通过计算，合理确定分批、分序张拉方案，可使纵向拉应力不超限，而无须为此额外增设纵向预应力。

E.4.2 张拉控制

对于环形预应力筋，张拉过程受孔道摩阻作用，会有应力损失称为摩阻损失，在控制张拉力一定情况下，其值取决于孔道摩阻作用，因此预应力效果不仅取决于张拉端控制张拉力，还与弹性伸长值有关，因此应采取双控，即既控制张拉力，同时需控制弹性伸长。

附录F 防水材料材质规定

F.0.1 三元乙丙橡胶、氯丁橡胶弹性密封垫的物理性能指标应满足表 F.0.1 要求。

表 F.0.1 三元乙丙橡胶、氯丁橡胶弹性密封垫材料物理性能要求

项目			指标	
			氯丁橡胶	三元乙丙橡胶
硬度（邵尔 A）度			45±5~60±5	55±5~70±5
扯断伸长率（%）			≥350	≥330
拉伸强度（Mpa）			≥10.5	≥9.5
热空气老化	（70℃×96h）	硬度变化值（邵尔 A）（度）	≤+8	≤+6
		拉伸强度变化率（%）	≥-20	≥-15
		扯断拉伸率变化率（%）	≥-30	≥-30
压缩永久变形（70℃×24h）（%）			≤35	≤28
防霉等级			达到、优于 2 级	达到、优于 2 级

注：以上指标均为成品切片测试的数据，若只能以胶料制成试样测试，则其伸长率、拉伸强度的性能数据应达到本规定的 120%；

F.0.2 遇水膨胀橡胶密封垫胶料物理性能应满足表 F.0.2 要求

表 F.0.2 遇水膨胀橡胶密封垫胶料物理性能要求

项目		性能要求		
		PZ—150	PZ—250	PZ—400
硬度（邵尔 A）度		42±7	42±7	45±7
拉伸强度（Mpa）		≥3.5	≥3.5	≥30
扯断伸长率（%）		≥450	≥450	≥350
体积膨胀倍率（%）		≥150	≥250	≥400
反复浸水试验	拉伸强度（Mpa）	≥3	≥3	≥2
	扯断拉伸率（%）	≥350	≥350	≥250
	体积膨胀倍率（%）	≥150	≥250	≥300
低温弯折（-20℃×2h）		无裂纹		
防霉等级		达到、优于 2 级		

注：1 成品切片测试应达到本指标的 80%；

2 接头部位的拉伸强度指标不得低于本指标的 50%；

3 体积膨胀倍率是浸泡后与浸泡前的试样质量的比率。

F.0.3 聚硫密封膏物理力学性能应满足表 F.0.3 要求

表 F.0.3 聚硫密封膏物理力学性能要求

项目		指标		
		20HM	25LM	20LM
密度，g/cm ³		1.6~1.7		
适用期，h		≥2		
表干时间，h		≤24		
流动性	下垂度（N 型），mm	≤3		

	流平性（L 型）	光滑平整	
定伸粘结性		无破坏	
浸水后定伸粘结性		无破坏	
冷拉-热压粘结性		无破坏	
弹性恢复率， %		≥70	
拉伸模量， MPa	23℃	>0.4 或 >0.6	≤0.4 和 ≤0.6
	- 20℃		
弹性回复率(%)		≥80	≥60
体积收缩率， %		≤25	
质量损失率		≤5	
注：适用期允许采用供需双方商定的其他指标值； 体积收缩率仅适用于乳胶型和溶剂型产品。			

F.0.4 聚氨脂密封膏物理力学性能应满足表 F.0.4 要求

表 F.0.4 聚氨脂密封膏物理力学性能要求

项目		指标		
		20HM	25LM	20LM
密度 (g/cm ³)		1.2~1.4		
适用期 2) (h)		≥1		
表干时间 (h)		≤24		
挤出性 1)		≥80		
流动性	下垂度 (N 型, mm)	≤3		
	流平性 (L 型)	光滑平整		
定伸粘结性		无破坏		
浸水后定伸粘结性		无破坏		
冷拉-热压粘结性		无破坏		
弹性恢复率 (%)		≥70		
拉伸模量 (MPa)	23℃	>0.4 或 >0.6	≤0.4 和 ≤0.6	
	- 20℃			
弹性回复率(%)		≥80	≥60	
体积收缩率(%) (%)		≤25		
质量损失率		≤7		
注 1): 此项仅适用于单组份产品。				
注 2) : 此项仅适用于多组份产品, 允许采用供需双方商定的其他指标值。				

本规程用词说明

1 为便于在执行本规程条文时区别对待，对要求严格程度不同的用词说明如下：

1) 表示很严格，非这样做不可的：

正面词采用“必须”，反面词采用“严禁”。

2) 表示严格，在正常情况下均应这样做的：

正面词采用“应”，反面词采用“不应”或“不得”。

3) 表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的：

正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”；

4) 表示有选择，在一定条件下可以这样做的，采用“可”：

2 条文中指明应按其他有关标准执行的写法为：“应符合……的规定”或“应按……执行”。

引用标准名录

《工程结构可靠性设计统一标准》GB50153

《建筑结构荷载规范》GB50009

《混凝土结构设计规范》GB50010

《水工混凝土结构设计规范》SL 191

《水利水电工程进水口设计规范》SL285

《钢结构设计规范》GB50017

《地下工程防水技术规范》GB50108

《水工建筑物抗震设计规范》SL 203

《盾构法隧道施工与验收规范》GB50446

《水工隧洞设计规范》SL279

中国工程建设标准化协会标准

盾构法输水隧道结构设计规程

CECS ×××: 2018

条文说明

目 次

1	总 则	62
2	术语和主要符号	63
3	基本规定	64
3.1	一般规定	64
3.2	承载能力极限状态设计计算	65
3.3	正常使用极限状态设计计算	65
3.4	耐久性规定	66
4	材料	68
4.1	混凝土	68
4.2	钢筋	68
5	荷载分类与组合	70
5.1	荷载分类	70
5.2	荷载组合	71
6	结构选型	73
6.1	一般规定	73
6.2	单层衬砌结构	76
6.3	双层衬砌结构	78
7	结构计算	80
7.1	基本规定	80
7.2	单层衬砌结构设计计算	81
7.3	双层衬砌结构设计计算	82
7.4	衬砌接头计算	85
7.5	整体稳定验算	85
8	衬砌构造规定	87

8.1	单层衬砌构造规定	87
8.2	双层衬砌构造规定	88
9	防水设计	92
9.1	一般规定	92
9.2	单层衬砌防水设计	92
9.3	双层衬砌防水设计	94
10	抗震设计	95
10.1	一般规定	95
10.3	衬砌抗震设计	96

1 总 则

1.0.1 近年来采用盾构法施工的水工隧道有了长足发展，不仅在一些规模较小的给水隧道、排水隧道和电站尾水隧道中应用，而且已成功应用到大型输水隧道工程中去，如南水北调中线穿黄隧洞、上海长兴岛青草沙输水隧道等工程，可以预料随着盾构法施工技术的发展、国产盾构机更多的被采用，将有更多的输水隧道工程采用盾构法施工。鉴于盾构法输水隧道的工作条件、结构特点与交通隧道不尽相同，为了规范设计，贯彻国家的技术经济政策，及时反映新的技术成果和建设经验，做到技术先进、安全适用、经济合理特制定本规程。

1.0.2 规程适用范围为内直径不小于 3m 采用钢筋混凝土衬砌的中、大型圆形输水隧道；规模较小，社会影响较小的输水隧道，当参考本规程采用时，在环保、安全的前提下，设计上可适当简化。

1.0.3 本规程主要根据一般工程条件制订，对于建设条件相对特殊的工程，如地震区、冻土地区、湿陷性黄土地区及膨胀土地地区的盾构法输水隧道工程，尚应符合国家有关现行标准的规定。

2 术语和主要符号

2.1.1~2.1.20 均为本规程中所采用的管道专用名词，其对应的英文名称是在国外文献中或国内生产厂引进国外技术所采用的名称。

3 基本规定

3.1 一般规定

3.1.1 国内目前的两个盾构法输水隧道实例，其一为南水北调中线的穿黄隧洞，采用双层衬砌穿行于黄河河床；其二为上海市供水工程的青草沙隧道，采用单层衬砌穿行于长兴岛长江南港水域河床。均为结合工程沿线的建设条件，通过技术经济、功能要求、环境影响和社会效益的综合评价，各自选择合适的衬砌结构型式和施工方法的范例。

3.1.2 盾构法输水隧道线路优选至关重要，本条列举了选线需综合考虑的地形、地质、水力、使用、施工等因素，提出了应尽量避免与其他建筑物交叉。初设阶段青草沙输水隧道从规划最优角度曾拟从沪崇苏长江隧道（以下简称长江隧道）盾构段上方穿越，初步设计后，考虑到长江隧道盾构段已先期施工，存在穿越风险、穿越工期和穿越段处理费用难以接受等问题，最后采用从长江隧道长兴岛工作井东侧穿越，对规划影响最小，同时避免了穿越长江隧道盾构段的巨大风险。

3.1.3 规定对有压输水隧道选择单层衬砌或双层衬砌结构型式时，需综合考虑地形与地质条件、输水压力与衬砌糙率、与已有建筑物交叉影响，以及施工条件等原则性问题。

3.1.4 《水工隧洞设计规范》规定，相应各种运行工况，无压输水隧道应确保自由水面以上净空不小于隧道断面积的 15%，以确保运行安全。

3.1.5 进水口是输水隧道重要建筑物，是影响线路比选的重要因素，应尽量布置在边坡稳定、岩土条件较好的位置，否则宜采用竖井式进水口。根据《水利水电工程进水口设计规范》有关规定，对于有压输水隧道，进水口口门均应有足够水深，确保运行工况下有压引水，并避免发生立轴漩涡；对于无压输水隧道，应确保闸后洞内为无压流态，并符合 3.1.4 条规定。

3.1.6 本条是对盾构法输水隧道结构计算的原则性规定：结构计算主要应基于荷载结构模型，采用结构力学方法进行；对于难以模拟为荷载结构模型的

问题，例如交叉洞段和纵向结构计算等有关问题则可以地层结构模型，采用实体有限元法进行。

3.1.7 本条规定了结构设计的方法，即采用以分项系数的设计表达，按照承载能力极限状态、正常使用极限状态的要求进行结构计算和验算，并应满足本规程有关构造的规定。

3.1.8 按现行国家标准《工程结构可靠性设计统一标准》GB50153 的规定，隧道结构中各类结构构件的安全等级，应符合隧道的安全等级和设计使用年限。

3.2 承载能力极限状态设计计算

3.2.1 规定盾构法输水隧道按承载力极限状态设计计算时，应包括的内容。

3.2.2 依据现行《混凝土结构设计规范》GB50010 和《建筑结构荷载规范》GB50009，本条给出了承载力极限状态设计的基本表达式，以及相应于建筑物安全等级的重要性系数。

3.2.3 给出了包括永久荷载效应、可变荷载效应和偶然荷载效应的荷载效应组合设计值的基本表达式，并对荷载分项系数取用在附录B中做了具体的规定。

3.2.4 给出了结构抗力设计值的基本表达式，以及对抗力模型不定系数的取值规定。对于基本荷载组合和特殊荷载组合，混凝土和钢筋均取强度设计值；对于偶然荷载组合，考虑到其偶然性，强度改用标准值；对于抗震设计，根据其受力特点，用抗震调整系数替代基本表达式中的抗力模型不定系数。

3.3 正常使用极限状态设计计算

3.3.1 依据现行《混凝土结构设计规范》GB50010 和《建筑结构荷载规范》GB50009，本条给出了正常使用极限状态设计计算的基本表达式。

3.3.2 对钢筋混凝土结构构件正常使用极限状态的荷载效应组合，只规定对永久荷载效应和可变荷载效应进行复核；对于偶然荷载效应组合，因发生机

率很小，且历时较短，在满足承载能力极限状态条件下，结构不会破坏，超限的裂缝宽度事后会减小或闭合，仍可继续使用，必要时可通过缺陷处理复原，因此对偶然荷载效应组合不要求复核。

3.3.3 对钢筋混凝土结构构件和预应力混凝土结构构件规定了正常使用极限状态验算应采用荷载标准组合，以及正截面受力裂缝控制分级和最大裂缝宽度限值。

3.3.4 盾构输水隧道作为水工建筑物，各阶段的变形和接缝张开度均不得超过本条文的规定值；当防水关系到工程安全时，还应结合防水措施，确定更为严格的控制值。

3.4 耐久性规定

3.4.1 隧道结构混凝土的耐久性往往表现为环境和材料劣化造成混凝土裂缝和钢筋锈蚀，因总碱含量超限会造成混凝土胀裂、粉化，进一步发展还可能引发结构承载能力问题，导致正常使用期未能达到设计基准期。因此规定隧道结构混凝土耐久性设计应遵守的原则，包括所处的环境类别的分类、环境作用等级的分级等内容，应符合国家现行标准《水利水电工程合理使用年限及耐久性设计规范》（SL 654）、《公路工程混凝土结构防腐蚀技术规范》（JTG/TB07-01）、《混凝土结构耐久性设计与施工指南》（CECS01）的规定。

3.4.2 为指导隧道结构混凝土耐久性设计，表 3.4.2 对其设计参数做了具体的规定。

其中氯离子扩散系数检测时间相对较长、方法复杂、费用较高，主要只用作设计使用寿命计算和确定配合比设计。而电通量检测相对快速、简捷，主要只用作控制现场质量。

隧道内壁混凝土受CO₂及其它废气侵蚀是主要的，因此强调了检测碳化深度；即快速碳化 56d的碳化深度。

氯离子扩散系数的检测方法，有自然扩散法、NEL法、RCM法，同一工程宜采用统一的检测方法，以免造成检测数据差异。

管片混凝土、管段混凝土及其它混凝土结构耐久性设计时，对混凝土原材料的要求，经实践表明，既是必要的、也是可以达到的。

3.4.3 为使混凝土耐久性设计参数符合表 3.4.2 规定，对拌制混凝土的原材料：水泥、骨料、粉煤灰、外加剂的质量做出具体的规定，同时按设计年限 50 年 100 年对混凝土总碱含量分别提出 3.0kg/m^3 和 2.5kg/m^3 的限值。

3.4.4 考虑到盾构输水隧道通常设计使用年限为 100 年，且正常工作状态隧道内充满水，维护很不方便，因此要求隧道内的铁制件除防腐措施外，本体再增加 2 毫米的防腐厚度。

3.4.5 为指导设计对防水材料的选择，在附录F中规定了防水材料的材质。

3.4.6 本条参照《地下工程防水技术规范》GB50108，根据工程埋置深度、围岩等级作出设计抗渗等级的规定，山岭隧道、水工隧洞的抗渗等级可按国家现行有关标准执行。

4 材料

4.1 混凝土

4.1.1 本规程混凝土材料强度的标准值和设计值均取值于现行《混凝土结构设计规范》GB 50010。其中混凝土等级按立方体抗压强度标准值确定，立方体抗压强度试件按标准方法制作，如设计无特殊规定，龄期为 28d，保证率为 95%。

4.1.2 混凝土强度标准值按棱柱强度取值，并对等级高于 C40 混凝土考虑折减系数后确定，所列表 4.1.2-1、表 4.1.2-2 分别为龄期 28d 的混凝土轴心抗压强度标准值和轴心抗拉强度标准值。

4.1.3 混凝土强度设计值按混凝土强度标准值除以混凝土材料分项系数 $\gamma_c=1.4$ 得到，所列表 4.1.3-1、表 4.1.3-2 分别为龄期 28d 的混凝土轴心抗压强度设计值和轴心抗拉强度设计值。

4.1.4 盾构法输水隧道作为水工建筑物，混凝土等级按水工结构相关规范测定。

4.1.5 根据国内试验资料，混凝土受拉弹性模量与受压弹性模量很接近，故二者取用相同的数值。混凝土受压或受拉弹性模量 E_c 取值于《水工混凝土结构设计规范》SL/T191-2008。

4.2 钢筋

4.2.1 盾构法输水隧道结构设计中，受力钢筋宜优先采用 HRB335 及 HRB400 级钢筋；预应力筋宜优先采用高强的钢绞线、钢丝。这样不仅可以提高混凝土结构的安全度水平，降低工程造价，而且可以降低配筋率，缓解钢筋密集带来的施工困难。

4.2.2 钢筋强度标准值和钢筋强度设计值是在综合《混凝土结构设计规范》（GB 50010）和《水工混凝土结构设计规范》SL/T 191 后确定，其中：

(1) 对于有明显物理流限的普通热轧钢筋，采用符合国家标准规定的屈服点作为标准值；

(2) 对于无明显物理流限的预应力钢丝、钢绞线、螺纹钢筋及钢棒，采用符合国家标准规定的极限抗拉强度作为标准值。

钢筋强度设计值

(3) 普通钢筋抗拉强度设计值按钢筋强度标准值除以钢筋材料性能分项系数 $\gamma_s=1.10$ 得到;预应力混凝土用钢丝、钢绞线、螺纹钢筋及钢棒的抗拉强度设计值则取为条件屈服点(取为 0.85 倍极限强度)除以钢筋的材料分项系数 $\gamma_s=1.20$ 得到。

4.2.3 本规程钢筋弹性模量是在综合《混凝土结构设计规范》(GB 50010)和《水工混凝土结构设计规范》SL/T 191 后确定，必要时可采用原材试验的实测值。

5 荷载分类与组合

5.1 荷载分类

5.1.1 本节表 5.1.1 所列的各种荷载及算法均按荷载结构模型给出，盾构法输水隧道作为水工建筑物，相较于一般公路隧道补充了内水压力、界面水压力及水锤压力等荷载，将按不同的衬砌型式，不同的工况分别组合到相应的荷载组合中。

5.1.2 所列自重荷载的算法相应于荷载结构模型，对于地层结构模型，通常以材料密度（平面问题为面密度，空间问题为体密度）直接输入，再由程序自动将其与重力加速度相乘换算为重度，再进行计算。

5.1.3 本节地层压力按竖向地层压力和水平地层压力分别计算：

1 竖向地层压力按松动土压力计算，并要求按对结构较不利，选用卸载拱理论或全覆土压力进行计算。

2 水平地层压力除要求按砂性土和粘性土分别采用水土分算和水土合算公式计算外，还要求选用侧压力系数作为主动土压力系数进行计算，以对结构较不利的结果采用：

①对于采用水土分算的砂性土，从对结构不利考虑，相应的公式不计入粘结力；

②对于采用水土合算的粘性土，要准确确定水平地层压力比较困难，为此提出了按主动土压力理论和按静止土压力两种算法；

③确定侧压力系数可基于工程类比、工程经验并参考表 5.1.3 选用。

表 5.1.3 侧压力系数 λ

土与水的计算	土的种类	侧向土压力系数 λ
水土分算	非常密实的砂性土	0.35~0.45
	密实的砂性土	0.45~0.30
	松散的砂性土	0~0.10
水土合算	中硬粘性土	0.55~0.65
	软粘土	0.65~0.75

	超软粘土	0.70~0.85
注：本表摘自《隧道标准规范》（盾构篇）及解说。		

5.1.4 当按水土合算时，外水压力不单独计算；当按水土分算时，视排水设施情况，在地下水位变动范围内，对不同的荷载组合，选用对结构不利的地下水位。

5.1.5 外加预应力在本规程指输水隧道双层衬砌内衬中，通过后张预应力筋而产生的作用力。

5.1.6 本规程界面水压力指因外衬或内衬渗漏而在界面上产生的渗压力。

5.1.7 内水压力是输水隧道的主要荷载，应按不同的荷载组合要求选用。

5.1.8 水锤压力可以与内水压力合并考虑。对于采用单层衬砌长距离压力输水时，宜采取相应措施减小水锤压力的不利影响。

5.1.9 温度效应在荷载组合中往往影响较大，宜采取施工措施缩小迎水面衬砌形成结构时的温度与运行期水体温度的温差。

5.1.10 地面荷载和施工荷载

对于浅埋隧道，地面荷载影响较大，必要时可于洞顶设置一定的缓冲层，以减小其不利影响。施工荷载主要是盾构的反推力对管片局部挤压作用，应通过地面试验，经验证管片满足承载要求后，方可进洞拼装。

5.1.11 按现行《水工建筑物抗震设计规范》，应就荷载结构模型和地层结构模型分别形成地震荷载和动力法有关资料。

5.1.12 在荷载组合中，对于沉船、爆炸、撞击等灾害性荷载不考虑同时出现。

5.2 荷载组合

5.2.1 荷载组合只是给出每一组合中应考虑荷载，而根据盾构法输水隧道设计经验，在高内水压工况下，随着衬砌外部土压力和水压力变小，衬砌结构会从小偏心受压向大偏心受压或小偏心受拉转变，使结构越来越不利，因此在荷载组合中，内水压力、水土压力作为主要荷载应按对结构不利取值，

分别进行验算。

5.2.2 根据衬砌结构运行、检修、施工各阶段，表 5.2.2 给出需考虑的荷载组合，并在附注中指出，应根据工程条件补充可能的不利荷载组合，以策安全。

6 结构选型

6.1 一般规定

6.1.1 目前盾构法输水隧道主要有单层衬砌、双层衬砌两类结构型式；其中双层衬砌细分为叠合式双层衬砌、复合式双层衬砌、分离式双层衬砌三种。应根据输水隧道工作任务、建设环境、线路特点、地质条件、施工技术，选用合适的衬砌型式。以下为各型衬砌的主要优点和缺点，供设计参考：

1 单层衬砌结构：

主要由盾构施工期间形成的拼装式管片环组成，为单层钢筋混凝土衬砌结构；出于保护管片结构，也有设置内衬的实例，用以增加结构的耐久性和减糙等因素，但对内部荷载只起传递的作用。单层衬砌结构主要承受自重和外部水土压力等荷载，在运行阶段主要承担内水压力等荷载。

2 双层衬砌结构：

指以盾构施工期间形成的拼装式管片环为外衬，在此围护下形成的钢筋混凝土衬砌（含预应力混凝土衬砌）为内衬，共同组成的双层衬砌。外衬因先于内衬形成，除单独承担自重外，主要单独承担承担土压力、外水压力；内衬形成后，因界面结构不同，结构特点各异，故又可分为叠合式双层衬砌、复合式双层衬砌和分离式双层衬砌。

1) 叠合式双层衬砌：内衬形成后，通过对外衬接触面加糙、设置阻滑键和插筋等界面结构措施与外衬紧密结合，界面结构不仅可以传递其后荷载产生的压力，还可以传递拉力及剪力。相应施工阶段由外衬承担其自重和外部水土压力等荷载，在形成叠合式结构后，内衬的自重以及运行阶段的内水压力等荷载由内外衬共同承担，具联合受力特性。

2) 复合式双层衬砌：外衬形成后，通常在其内壁面铺设软垫层形成界面结构，再浇筑内衬，以组成复合式双层衬砌。此种界面结构可认为只能传递压力，但不能传递拉力及剪力。因此施工阶段由外衬承担其自重和外部水土压力等荷载，形成复合式结构后，内衬的自重以及运行阶段的内水压力等

荷载由内衬与外衬分担，分担的比例取决于界面结构的线刚度，具一定程度的联合受力特性。

3) 分离式双层衬砌：外衬形成后，当在其内壁面铺设的软垫层有足够厚度，或内衬与外衬分离（为防止内衬转动，以不影响内、外衬控制截面内力条件前提下，内衬与外衬在拱底有局部连接），可认为内衬与外衬之间无力的传递或力的传递可忽略不计；相应外衬、内衬分别承担其上荷载，可视为具单独受力特性。

3 衬砌结构型式的优缺点

1) 单层衬砌结构：

主要优点：

①结构受力明确；②内外水压力部分抵消，当内外水压差较小时，较经济、合理；③施工简单；④施工工期短。

主要缺点：①管片结构除外表面承受水土压力外，因内表面直接承受内水压力作用，对结构耐久性有一定影响，故耐久性要求较高；②不能承受过高的内外水压差；③未设置内衬，表面接缝多，糙率较大，水头损失较大，为抵消此不利影响，需适当增大输水断面；若设置薄层内衬防护，也会带来投资的增加；④当内水压力较高于外水压力时，存在内水外渗的风险，需加强接缝防水。

2) 叠合式双层衬砌：

主要优点：①内衬为迎水面，结构缝较少，糙率较小，水头损失也较小；

②外衬与内衬结合为整体结构，共同分担内水压力等主要荷载，因内外水压力可部分抵消，对结构受力有利，宜在内外水压差较大的工程采用；且因结构刚度大，有较强的抵御变形能力；③外衬接缝无须考虑内水压力直接作用；④外衬内表面的耐久性要求较低。

主要缺点：①内外衬作为叠合构件工作，受力较复杂；②内衬相应于管片接缝处是应力集中部位，易产生裂缝，需采取加强措施；③为使内衬与外衬紧密结合，界面结构措施通常包括：接触面加糙、设置阻滑键与插筋，费

用较高；④施工质量要求较高，施工难度较大，工期较长。

3) 复合式双层衬砌：

主要优点：①内衬为迎水面，结构缝较少，糙率较小，水头损失也较小；②外衬参与分担部分内水压力等主要荷载，相应内外水压力可部分抵消，宜在内外水压差较大的工程中采用；③外衬只需回填手孔，内壁面不用处理；④外衬内表面的耐久性要求较低。

主要缺点：①界面结构通常为软垫层，因具联合受力特性，软垫层不宜过厚，当内水压力较高时，若内衬压力水渗至界面，易因排水不畅，形成较高的界面水压力，对外衬受力不利；②若较高压力的内水渗至界面，存在渗出外衬的风险，需加强接缝防水；③界面结构的软垫层长期使用，弹性模量的变化，内衬与外衬对内水压力等荷载的分担具有一定的不确定性；④双层衬砌，工程费用较高。

4) 分离式双层衬砌：

主要优点：①内衬为迎水面，结构缝较少，糙率较小，水头损失也较小；②内衬与外衬分别单独承载，受力明确，宜在内外水压差较大的工程中采用；③外衬只需回填手孔，内壁面不用处理；④外衬内表面的耐久性要求较低。

主要缺点：①若较高压力的内水渗至界面，若排水不畅，存在渗出外衬的风险，因此为顺畅排放界面压力水，需设置较完善的排水设施，并需加强监控；②为防止内水渗至界面，需加强接缝防水；③因具单独受力特性，当内外水压差较高时，内衬多采用钢管或采用预应力混凝土结构。例如我国刚建成并已投入运行的穿黄隧道，其内外水位差为 18m，采用分离式衬砌，其内衬采用预应力混凝土结构。④双层衬砌，内衬断面较单层衬砌大，工程费用较高，工期也较长。

6.1.2~6.1.3 隧道检修前需配置排水设施，先排除洞内积水，为尽快排空，要求排水设备功率较大；为进洞检查、缺陷处理，排放渗漏水将持续检修期间，但所需排水设备功率较小；因此排水设备应就两者不同的排水特点分别设置；对于长大隧道为方便检修，宜在洞内设置行车道，有利于提高检修功

效。

6.1.4 无压隧道应确保水面以上净空面积不小于全断面积的 15%，隧道若发生沉降会使水面以上净空面积减小，为安全运行，设计阶段应根据地质条件和工程运用条件，预估可能的沉降量，对净空面积留足富裕量。

6.1.5 当围土为砂性土时，容易为渗漏水冲蚀，影响隧道整体稳定，因此对管片接缝更应加强防渗，必要时内侧和外侧均需设置密封垫防渗。

6.1.6 对于与始发竖井或到达竖井连接的洞段，因洞井之间往往有明显的差异性变形，因此单层衬砌和双层衬砌外衬均应设置一道或多道大变形缝；双层衬砌结构内衬则应加密结构缝。除此对于沿线地层变化明显的洞段，为适应不均匀沉降，双层衬砌结构也应在此洞段前后沿纵向加密设置结构缝。

6.1.7 为满足施工期隧道抗浮稳定，并增强施工期盾构开挖面的稳定性，确保泥水盾构有压泥水舱密封要求，隧道应有足够的覆土厚度。

6.1.9 盾构隧道与围土紧密贴合，不仅可充分利用围土抗力，也是隧道整体稳定的需要。但由于盾构的开挖直径大于管片外部轮廓，当已拼接的管片退出盾尾时，管片与地层之间会出现空腔，均需对空腔进行灌浆，为了充填饱满，满足《盾构法隧道施工与验收规范》对充填系数的要求，通常还需进行二次灌浆，因此在管片预制时，均应预留二次注浆孔。

6.2 单层衬砌结构

6.2.1 盾构法输水隧道单层衬砌结构不同于交通隧道的单层衬砌结构，在于运行期需承受内水压力等荷载，当运行水压较高，地质条件不良，拼装式管片环需要增加管片厚度和配筋，提高其承载能力，并需设置双层连接螺栓，以约束接缝变形；此外施工期间，管片需承受盾构掘进的反推力，单块管片重量受拼装机起重能力的限制等，都是确定管片截面厚度和分块需要考虑的。

6.2.2 由于无压隧道具有工程投资较小、施工简单、施工工期较短等优点，因此直径较小的陆域水工隧道多有采用，如辽宁大伙房输水隧道等。对于穿行于河床（或海床）冲淤变化明显的水底隧道、内外水压差较高或输水流速

较高的隧道、围土有可能对隧道产生偏压的隧道，则不宜选用单层衬砌结构。而对于直径较小，埋藏较深，冲淤变化影响不大，不存在围土偏压，输水流速较低的隧道选用单层衬砌则比较合适；例如上海水源地青草沙输水隧道，于长兴岛南港过江的管段2条，围土均为第四纪松散沉积物，为有机质软土，水土荷载可视为对称分布；洞内中心水头约34.5m，算至洞底并考虑水锤，最大内压水头41.22m，内外水头最大压差小于9m；设计流速较低为1.85m/s；南港为复式河槽格局，主槽均为顺直河槽，落潮主流一直傍靠南岸下泻，仅出现一定幅度的淤积和恢复性冲刷的交替变化，冲淤变化较小，且因埋藏较深，河床冲淤对管段影响较小；根据以上情况，过江单管采用单层衬砌结构，外直径6400mm、内直径5500mm，，厚450mm，至今运行良好。

6.2.3 单层衬砌结构采用环间错缝拼装，各环承载得以相互补偿，纵向螺栓错缝相连，提高了相互约束变形的能力，因此宜考虑采用；为实现要错缝拼装，相邻管片环需旋转对位，各环管片环向螺栓间距应相同。此外为在满足设计要求前提下，减小管片厚度，减轻管片重量，有利于拼装机选型，混凝土强度不宜低于C40。

6.2.4 采用单层衬砌结构的青草沙输水隧道，管片纵缝接头往往轴力较小而需承受较大正、负弯矩，加上手孔对管片的削弱，角缘易出现应力集中，为此采用了铸铁手孔，双排螺栓，较好地解决了应力传递与不利应力条件问题。

6.2.5 对于纵向连接螺栓，一般有直螺栓、弯螺栓、斜螺栓等，与水平插销式相匹配的是插入式连接。弯螺栓其变形较大，不适用于盾构法输水隧道。斜螺栓的手孔小，对截面削弱少，相对变形小，且施工方便，但费用相对直螺栓稍高；直螺栓较有利于力的传递，但由于安装要求，手孔较大，对管片削弱较大，因此对于有纵向变形问题的输水隧道，宜通过对各种解决方案综合比较后选用。

6.2.6 为避免加大单层衬砌表面糙率，应封填管片手孔、整修错台、密封接缝，必要时加贴防护层，以利输水运用。

6.3 双层衬砌结构

6.3.1 双层衬砌结构按界面结构分为叠合式双层衬砌、复合式双层衬砌和分离式双层衬砌，其中叠合式和复合式双层衬砌受力特性具联合受力特性，分离式双层衬砌具单独受力特性。应根据工程环境、工作特点、承载要求、地质条件选取合适的结构型式。以南水北调中线的穿黄隧洞为例，主要设计条件如下：

1 工程环境：工程位于黄河游荡性河段，主流摆动，河床冲淤变化明显，需考虑隧洞沿纵向变形的不利影响；

2 工作特点：双线隧洞，圆形过水断面直径 7m，设计糙率 0.0135，设计流量 $265\text{m}^3/\text{s}$ ，相应流速 3.44m/s，加大流量 $320\text{m}^3/\text{s}$ ，相应流速 4.16m/s，可利用水头损失 10m；

3 主要承载要求：压力输水，单洞长度 4.25km，内水压力：设计工况为 0.51MPa，非常工况为 0.55MPa；内水压力高于外水压力约 0.18MPa；

4 地质条件：第四系全新统砂层和中更新统粉质壤土层，地震基本烈度 VII 度，存在砂土震动液化的可能。

编制初步设计报告时，正如上述，考虑到工程位于黄河游荡性河段，主流摆动，河床冲淤变化明显，内水压力高于外水压力约 0.18MPa，最大流速 4.16m/s 等情况，计算分析表明单层拼装式钢筋混凝土管片环存在承载和管片接缝外张等问题，有内水外渗冲蚀洞外砂层围土的隐患，存在隧洞失稳的可能，而选用双层衬砌工程更为安全；此外双层衬砌能实现糙率 0.0135，通过加大流量 $320\text{m}^3/\text{s}$ 更有保障。对于双层衬砌的三种型式选择上，考虑到如此大型的输水隧洞在国内尚属首例，安全至为重要，而分离式双层衬砌相较叠合式和复合式双层衬砌受力更为明确，施工较简单，得已采用。

6.3.2 穿黄隧洞采用的分离式双层衬砌，其界面结构由厚度 10mm 的弹性排水垫层组成，为防止内衬转动，内衬与外衬在拱底局部范围浇筑为整体，计算表明，对内衬与外衬控制截面内力条件影响小，仍具单独受力特性。

6.3.3 对于叠合式双层衬砌，应对界面采取可靠的结构措施：包括管片内侧

面凿毛或冲毛加糙，利用手孔回填混凝土形成阻滑键和安装插筋，采用等强、快硬混凝土回填手孔等行之有效的结构措施，方可使内衬与外衬结合为一整体，实现联合受力。

6.3.4 冲淤变化明显的水底隧道，往往存在纵向变形问题，单层的管片环环向接缝有张开的可能；内水压力较大的隧道，往往因内、外水压压差较大，存在承载问题和接缝变形超限问题；流速较大，会因单层衬砌糙率较大带来较大的水头损失；围土偏压对单层拼装式管片环极为不利，有可能存在结构失稳问题。为回避上述问题，宜选用双层衬砌。

6.3.5 内衬结构缝渗漏除水量损失和冲蚀混凝土外，当内水渗至界面而排水不畅通时，界面渗透水将起压，对拼装式外衬受力尤为不利。因此应按国家标准，做好结构缝防水。

6.3.6 当内水压力较高时，内、外水压差也较大，内衬虽然仍可按普通钢筋混凝土结构设计，但当过水断面不变，为满足正常使用要求，往往需要加厚截面，加强配筋，致使外衬断面与盾构机直径也随之加大，增加工程投资。鉴于预应力技术适于解决承载和正常使用的一系列优点，特别是环锚预应力技术已成功应用到隧道工程的今天，可通过比较应用到内衬中。

7 结构计算

7.1 基本规定

7.1.1 本条规定了盾构法输水隧道结构计算项目。

7.1.2 规定了荷载结构模型和地层结构模型适用的计算项目。

7.1.3 对采用地层结构模型解决纵向变形问题，规定了相应的计算方法：软土地基一般可采用分层总和法，而以地层结构模型采用实体有限元法作为分析对比。

7.1.4 本条系根据《工程结构可靠性设计统一标准》GB50153 的规定，采用极限状态设计方法，对工程各个工作阶段相应的工况，分别进行结构承载力极限状态计算和正常使用极限状态验算；对于计入设计地震荷载或其它偶然荷载的工况，根据大震不垮，不致发生危及生命的严重破坏原则，只要满足承载力极限状态，结构不发生破坏，在此过程出现裂缝，震后通过处理结构仍可继续使用，因此可不验算结构的裂缝宽度。

7.1.5 所列四种情况，均因有可能导致输水隧道沿纵向发生差异性变形，影响衬砌纵向承载，并有可能造成拼装式管片环纵向连接螺栓超限，环向接头张开，因此规定应予复核，并根据复核结果采取相应措施。

7.1.6 结构计算模型往往关系到计算结果多大程度上反映实际情况，因此应充分重视对计算模型的拟定，可考虑以下条件拟定：

- 1 地质条件（地层分层及物理力学指标、地层抗力、地下水分布等）；
- 2 衬砌构造（衬砌结构、拼装式管片接头构造等）；
- 3 工作阶段（施工期、运行期）。

计算模型中宜对计算条件作多种组合，通过敏感性分析，使计算结果能正确指导设计。

7.1.7 考虑到设计条件与客观条件，施工条件与设计要求的差距，为保障工程安全运行，对承载条件和地质条件较复杂的代表性洞段宜布置原型安全监测，以便及时发现问题，尽早处理；并为工程验收做好准

备。

7.2 单层衬砌结构设计计算

7.2.1 对位于软土地区的盾构法输水隧道，当采用荷载结构模型进行横向结构计算时，常用算法为：弹性匀质圆环法、弹性铰圆环法，当采用地层结构模型进行结构计算时，常用算法为实体有限单元法。注意到日本国出版的《内水压作用下隧道衬砌构造设计手册》，亦认为有内压的隧道施工阶段（自重和外部荷载作用时）如同盾构法交通隧道，适于采用惯用法、修正惯用法、弹性地基刚架模型法进行内力计算；但在内水压力作用阶段时（自重、外部水土荷载和内水压力同时作用），就应该考虑弹性地基的抗力作用，以反映隧道与地层共同作用；显然就算法而言与本条规定基本一致。

7.2.2 对于考虑弹性抗力的算法，弹性抗力系数的取值对计算结果有重要影响，因此对于重大的输水隧道工程，应通过试验，测取弹性抗力系数；对于一般工程在按附录取值后，也需结合工程类比，通过敏感性计算，合理选用。

7.2.3 当采用荷载结构模型的弹性铰法进行结构计算时，需要先确定接头弯曲刚度系数、接头轴向刚度系数和接头剪切刚度系数，其中以接头弯曲刚度系数为重要；对于重大的输水隧道，为了正确反映接头的刚度特性，宜进行管片接头模拟试验和足尺仿真试验，以确定其刚度系数的大小。据有关资料，对于无衬垫接缝，接头弯曲刚度系数与接头转角基本上呈线性关系；对于全断面有衬垫的接缝，因衬垫弹性模量较低，初始加荷时，衬垫容易压缩，转角发展较快，继续加荷，待衬垫发展至强化阶段，转角发展渐慢，因此接头弯曲刚度系数与接头转角关系不呈直线状，往往呈先弯后直的形态。总之对于重大的输水隧道工程，在编发施工图前，宜通过接头试验，测取上述三者接头刚度系数，对设计做进一步复核，以策安全。在初步设计阶段，可先按工程类比，对接头弯曲刚度系数在 $1000 \sim 10000 \text{ kN-m/rad}$ 范围选用，同时将弹性铰法结构计算结果与弹性匀质圆环法或地层结构模型算法结果进行对比复核，再用到工程设计中。

7.2.4 管片接缝允许变形量应根据接缝防水要求而定。与交通隧道不同的是不仅要防外水内渗，更要防内水外渗。上海青草沙隧道在管片接缝外侧和内侧均布置了防水密封垫，在 2 倍内、外水压（0.85MPa）分别作用下进行试验，在接缝张开 6mm、错缝 5mm 情况下，满足不渗漏要求。

7.2.5 对于有纵向地基沉降变形问题的隧道，会导致环向接缝张开，应通过纵向结构计算，复核环向接缝变形量，同样要求不得超过允许变形量，以满足防水要求。

管片环的纵向结构计算通常采用纵向等效刚度梁模型：

（1）管片环断面以梁单元离散模拟、而管片环环向接头则以轴向、旋转和剪切弹簧模拟（纵向梁-弹簧模型）；

（2）对于管片环纵向连接，为简化模型，可以刚度等效的均质梁模拟，而通过折减纵向刚度来考虑实际刚度因管片环接头下降的情况。

7.2.6 当按地层结构模型采用实体有限单元法进行结构计算时，应将其应力计算结果，换算为截面内力，以便按《混凝土结构设计规范》进行配筋设计。

7.3 双层衬砌结构设计计算

7.3.1 双层衬砌结构的外衬为拼装式管片环，与单层衬砌结构类同；不仅施工期结构工作状态相同，运行期其内壁虽然不直接承受内水压力，但对于复合式双层衬砌和分离式双层衬砌，还需对可能承受的界面渗压力进行结构复核。因此除应满足本节有关外衬结构计算的规定外，尚应满足 7.2 节单层衬砌结构计算有关规定。

7.3.2 分离式双层衬砌为防止内衬与外衬相对转动，在内衬与外衬底部采取一定的连接措施，按圣维南原理，不会过多地影响拱部和两腰截面的应力分布，而底拱通常不是控制结构计算的部位，因此外衬、内衬仍可视各自具有单独受力特性。南水北调中线穿黄隧洞按分离式双层衬砌设计，其界面结构为厚度约 10mm 的格栅排水型弹性软垫层（以下简称排水软垫层或垫层），由于垫层厚度足够，线刚度很低，外衬、内衬各自具有单独受力的特性，同

时格栅能顺畅排放界面渗漏水，降低界面渗压力，对于外衬十分有利。

7.3.3 南水北调中线穿黄隧洞工程曾就隧洞双层衬砌型式开展 1:1 地下模型仿真试验研究，通过开挖，将试验模型深埋于地下再回填与工程典型断面类同的厚达 30.9m 的砂料和土料，以形成外部的围土条件；通过设置防水土工膜包裹模型和人工围土，并设地下水位调节井和多层地下盲沟，通过充水控制地下水位，以形成与工程相同的人工水土环境；并以高位水箱以定水头方式模拟设计水头 51m 的内水压力和超载水头 56m 的内水压力(参见图 7.3.4)。模型内布置两个试验段，分别模拟分离式双层衬砌和叠合式双层衬砌。试验结果经组织专家评审认为，分离式双层衬砌和叠合式双层衬砌均是技术可行的方案。

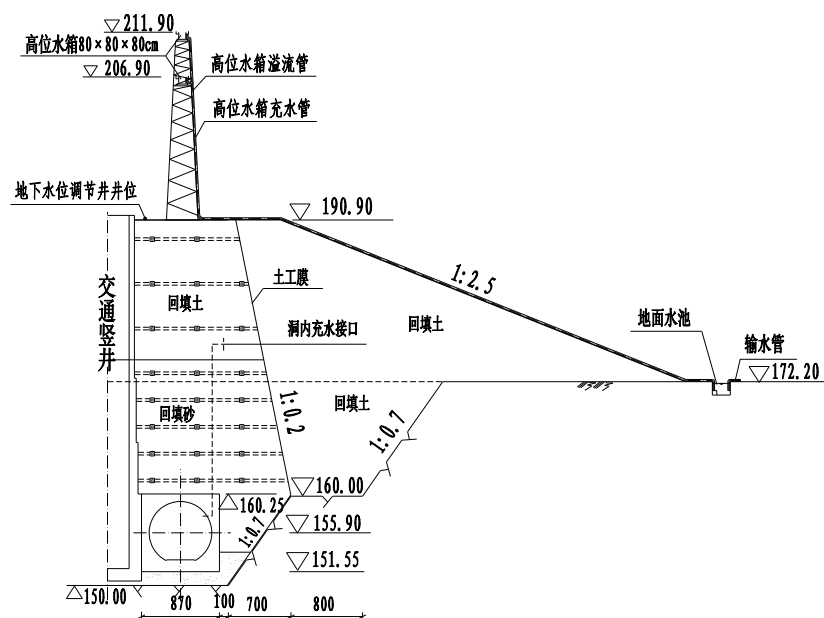


图 7.3.4 穿黄隧洞 1:1 地下模型仿真试验模型剖面图

7.3.4 预应力内衬结构计算与设计包括：

- 1 预应力系统选择：目前隧洞预应力多采用环锚预应力系统；
- 2 预应力损失计算，并形成单束预应力荷载；
- 3 锚索张拉方案；应力控制、伸长控制、张拉分批和分序等；
- 4 结构计算，确定控制性的内力分布；
- 5 对施工期、运行期各工况进行承载能力极限状态和正常使用极限状态计算；

6 截面设计：进行配筋计算、配筋设计，并按设计要求和构造规定形成技术要求。

7.3.5 由长江勘测规划设计研究院（以下简称长江设计院）设计的湖北省清江隔河岩水电站引水隧洞在 1#和 3#洞衬砌采用有台座张拉的群锚预应力系统（简称QM锚），与此同时，在完成环锚预应力研制后，在 2#和 4#洞衬砌采用无台座张拉的环锚预应力系统（简称HM锚），均获得成功。由于环锚预应力系统只需对每束锚索开设一个预留槽，布置 1 台千斤顶，无需台座在洞内进行张拉，截面削弱小，预应力损失小，工艺简单，其后在穿黄工程、天生桥二级电站、小浪底水利枢纽排砂洞、大伙房引水洞均陆续采用。由于预应力摩阻损失，单索预应力荷载自预留槽张拉端向两侧对称但并非均匀分布，为此预留槽应左右间隔布置于隧道轴线两侧，通过相互补偿，使预应力效果趋于均匀。

7.3.6 内衬当采用后张有粘结预应力系统，需在混凝土中预埋孔道，待混凝土达到设计强度后，再穿入预应力筋进行张拉；在混凝土浇筑过程中，除需对孔道线型控制外，特别要注意防止孔道接头漏浆、堵管，因为一旦发生堵管，处理既费时也困难，而且即使处理好了，孔道糙率也会加大而增加摩阻损失，因此须在混凝土浇筑过程中，加强检查，在浆液尚未结硬时清除，以防患于未然；预应力筋穿束前还应对孔道进行检查，包括采用孔道电视检查，发现残渣附着孔壁，需及时清理；为孔壁减糙，必要时还可对预应力筋涂抹石墨粉，但应通过试验，完善相应的工艺，再应用到工程中。

7.3.7 内衬采用后张无粘结预应力系统，需遵守《无粘结预应力混凝土结构技术规程》的规定：

1 防腐：预应力筋靠油脂防腐，为此应按对油脂防腐性能进行检测；一旦防腐失败，不仅预应力将全部消失，而且还不能如同普通钢筋一样参与承载，后果是很严重的；

2 配置的普通钢筋承载力不得低于预应力筋总承载力的三分之一，或不小于全部受力筋总承载力的四分之一，作为安全保障。

7.3.8 后张预应力筋张拉控制应采用双控；

1 应力控制：未经论证不应超过 0.75 倍标准强度，以便为预应力预案留有超张拉空间，也是安全的要求；

2 与张拉控制值相应的弹性伸长，亦是该孔道摩阻系数的表征；当实测弹性伸长值小于伸长控制值时，表明孔道摩阻系数较大于设计值，可根据反演得到的摩阻系数，以满足设计的预应力效果为前提，提出超张拉预案，但超张拉应力不应超过 0.8 倍预应力筋的标准强度。

7.4 衬砌接头计算

7.4.1~7.4.2 接头承载力复核主要参照《混凝土结构设计规范》GB 50010 中正截面承载力计算有关规定，并说明以下：

1 附图中弯矩和轴力均为简化到接头截面形心的设计内力；

2 按平截面假定，将边缘达到混凝土强度设计值的受压应力图形，简化为均达到混凝土强度设计值的等效矩形应力图形，附图中 x 为简化为等效矩形应力图形高度， x/β 为实际受压应力图形高度；

$3\alpha_1$ 为考虑混凝土受压区应力图形简化为等效矩形应力图的折减系数，当混凝土强度等级不超过C50时取 1.0，当混凝土强度等级为C80时取 0.94，其间按线性内插法确定。

4 β 为等效矩形应力图形高度与受压区混凝土实际应力图形高度的比值；当混凝土强度等级不超过C50时取 0.80，当混凝土强度等级为C80时取 0.74，其间按线性内插法确定；

5 当连接螺栓（简称螺栓）受拉时，如同普通钢筋取用承载力设计值；

6 按所附公式复核，若连接螺栓受压，则不考虑该螺栓作用，再重复计算。

7.5 整体稳定验算

7.5.1 就地质条件而言，当地下水位高于洞顶且埋深较浅的洞段抗浮条件为

较不利；就验算工况而言，以洞内无水的盾构施工期与检修期工况，以及使用阶段遭遇大于 7 度（含 7 度）地震作用的工况的抗浮条件较不利，因此应就不利洞段和不利工况验算抗浮稳定。

7.5.2 岸坡式、岸塔式隧道进水口、出水口背靠岸坡为挡土结构，而明洞段两侧当所承受的土压力不对称时，均有可能存在抗滑稳定与抗倾稳定问题，因此需要验算。

8 衬砌构造规定

8.1 单层衬砌构造规定

8.1.1 管片环通常分为标准管片环和楔形管片环两类，其中楔形管片环又可分为曲线用和蛇行修正用两种。随着盾构机技术进步，配备了自动导向与纠偏系统，对于线形简单，平曲线和竖曲线较少的线路，多采用通用型楔形管片环；楔形环环面斜率在满足最小半径曲线段拟合需要前提下，宜取较小斜率。当路线曲线半径较小时，宜取双面楔形。例如上海青草沙输水隧道穿越长兴岛南港的过江管为平面直线、竖面微倾管段（坡度约 0.84‰），线形简单，盾构机配备有自动导向与纠偏系统，采用了通用型双面楔形管片环。

8.1.2 管片环的宽度：宽度较小的管片有利于运送、拼装、缩短盾尾长度和提高盾构的灵敏度，但增加管片环环向接缝，对防水不利；宽度较大的管片，要求拼装机和推进油缸容量较大，并将增加盾尾长度，但可减少管片环向接缝，对防水有利。因此要根据盾构机设备能力和防水条件比选确定，不过随着盾构机技术进步，管片环宽度有逐渐加大的趋向。上海青草沙输水隧道过江管将管片环全环分为 6 块，由 1 块小封顶，2 块邻接块，3 块标准块构成，环宽定为 1.5m，单块管片重量约 72kN。

8.1.3 上海青草沙输水隧道过江管根据防外水和防内水的需要，除在管片环外侧设置了海绵挡水条和弹性密封垫止水，同时根据最大内压水头 41.22m 的条件在内侧也设置了弹性密封垫止水和嵌缝槽；密封垫止水材质均为三元乙丙橡胶，断面型式为挤出硫化成型的多孔构造。

为提高接缝的抗剪能力，解决可能发生的纵向变形，并为满足拼装承接千斤顶撑靴的推力和定位需要，管片的环缝面通常设置凹凸榫槽。上海青草沙输水隧道过江管环面设有凹凸榫槽，以 16 根纵向斜螺栓相连；管片纵缝为平缝，未设凹凸榫槽，只为方便施工对位，设置直径 30mm 的导向杆，管片间纵向接缝设 6 根直径 39mm 的高强螺栓相连，全环共 36 根。以上所述管片环与环、块与块间均用螺栓连接，虽施工操作较麻烦，用钢量大，但可增

加隧道抵抗变形的能力，有利于保证施工精度、施工安全及衬砌接缝防水。

8.1.4 管片的制作精度和整环拼装检验允许误差有关规定均摘自《盾构法隧道施工与验收规范》(GB50446-2008)，应按规定执行。

8.1.5 当前管片环封闭块有三种拼装方式：

1 径向直接顶入型：优点是拼装方便，缺点是两侧邻接块之间预留的缺口需按封闭块外弧弦长留出，拼装后，因挤紧成环错台较大；

2 纵向直接插入型，优点是体形设计简单，拼装方便、错台较小，缺点是所需千斤顶行程较大，致使盾构机加长，有可能增加投资并影响其灵敏度；

3 纵向搭接径向顶入型封闭块，优点是所需千斤顶行程和错台介乎前两种之间，缺点是设计较复杂，其搭接长度需结合封闭块纵缝面接头角、偏转距离和允许错台量综合分析后确定，而且错台量与封闭块径向顶入缺口所需的初始间隙关系甚大，因此对拼装工艺要求较高。上海青草沙输水隧道过江管根据自身的工程条件，封闭块按纵向搭接径向顶入型设计，纵向搭接长度为 1m，即 2/3 的管片宽度。

8.1.7 管片退出盾尾的过程，对管片环与地层之间的空隙进行了一次注浆；为达到《盾构法隧道施工与验收规范》(GB50446-2008)所要求的充填系数，管片上预留的注浆孔用于二次注浆。

8.2 双层衬砌构造规定

8.2.1 双层衬砌结构的外衬为拼装式管片环，施工期结构工作状态与单层衬砌结构相同，因此除应执行本节有关的构造规定外，尚应执行 8.1 节单层衬砌有关的构造规定。

8.2.2 双层衬砌内衬结构受温度变化、混凝土干缩和纵向不均匀沉降作用时，应设置环向贯通型结构缝（简称环缝），缝内设止水。环缝间距应根据温度荷载、地质条件和围土（岩）性状，以及距离工作井（盾构始发竖井或到达竖井）远近而定；为避免内衬发生不均匀沉降对管片的不利作用，内衬环缝间距宜为管片宽度的倍数，其最大间距在软基中不宜超过 18m，岩基中不宜超过 12m。

8.2.3 对于与工作竖井邻接的隧洞段，以及地层性状有突变的隧洞段，为避免地基不均匀变形使内衬产生对整体性有影响的裂缝，环缝应按管片宽度的倍数加密。穿黄隧洞外衬管片宽度为 1.6m，内衬标准分段长 9.6m，为管片宽度的 6 倍；北端与工作竖井相连，内衬向着竖井方向结构缝间距顺序按 1 段 8.0m、1 段 6.4m、3 段 4.8m、5 段 3.2m 加密。

8.2.4 《混凝土结构设计规范》（GB 50010）关于混凝土保护层最小厚度的附表是按使用年限为 50 年给出的，对于设计使用年限为 100 年的盾构法输水隧道衬砌结构，最外层的钢筋保护层厚度应不小于该表所列数值的 1.4 倍。

8.2.5 在界面敷设足够厚的弹性垫层，是分离式双层衬砌结构确保其内、外衬具单独受力特性的必要条件；但当界面有内衬或外衬的渗漏水时，若排水不畅通，将产生较高的渗压力，对衬砌受力不利，因此垫层还须有良好的排水性能，并应配套完善的排放管道等排水措施，以便畅通排放界面渗漏水；而防患于未然，必要时垫层外侧还需增配防水膜，以防止内水压力较高的渗漏水外渗到洞外，冲蚀围土，影响隧道整体稳定。对垫层的铺设质量要求，既是为了确保现浇内衬混凝土质量，同时也是为了确保垫层排水通畅；至于隧道积水和渗漏水不宜共用同一套排水机械，是由于两者排水的不同特点（积水量大需尽快排除，渗漏水量小，断续运行，延续时间长），因而所需机械功率不同，运行时间也不同的缘故。

8.2.6 管片脱模后，内侧应及时凿毛（或冲毛），以增强与内衬接触面的剪切强度；在拼装成环后，于管片手孔内安装插筋，但由于手孔较浅，为充分锚固，可与连接螺栓焊牢，或设直弯钩；当采用带有内螺纹的接驳器预埋在管片时，接驳器应带锚筋，以满足自身锚固要求；为使手孔充填密实，插筋充分锚固，应对充填腰线以上手孔的混凝土开展室内试验，再通过室外试验验证，比选混凝土材料、配合比和施工工艺，形成与管片等强、快硬、微膨混凝土，以便先期回填；对于腰线以下手孔则可与内衬一起现浇混凝土，与内衬混凝土结为整体。

8.2.7 隧道衬砌采用环锚预应力系统，当张拉未能达到设计要求而需拆除通

常是比较困难的，为确保工程质量，张拉前要做好充分的准备工作，包括：

1 器材检测：其中张拉机具拉力与油压计量设备进行复核率定，要根据施工过程对张拉质量的认定和张拉数量，定期对张拉机复核率定；静载组装件锚固性能试验是对锚具的检验，为方便定期抽检，供检验的张拉台座宜布置在现场。

2 预应力筋编束组装：对组成预应力筋的各束钢绞线要编号，并按对号入座的原则，套入工作锚板的锚孔中，以便各束均匀受力。

3 预留槽布置：需要强调的是，混凝土浆液漏入孔道，如不及时清除，在孔内一旦结硬，很难清除干净，若未能清除，则要对堵塞段凿开清理，不仅延误工期，对衬砌结构的整体性也不利，因此浇筑内衬混凝土过程，预留槽应开口于模板之外，以便施工期间可随时对孔道检查和清理淤积物。

4 孔道布置：孔道架立若不在同一环向平面，孔道线形与设计曲线不符，均会增大摩阻损失，应予以重视；特别是弯入预留槽的小弧段（即图E.1.2 的第1圆弧段）若偏靠隧道的内壁面，还有可能造成混凝土崩裂，宜采用样架钢筋定位架立。

5 喇叭管是控制预应力筋线型的节点，安装时应严格控制其中心线位置，偏高容易造成上方混凝土出现裂缝，过低将影响工作锚板浮动，甚至使张拉无法进行。

6 预应力筋就位：施工经验表明，在孔道内预放一根可供牵引的钢丝，可供混凝土浇筑期间，随时检查和清理孔道漏浆；张拉前，将预应力筋一端套上穿束导向帽，与预留在孔道内的牵引钢丝相连，则方便采用机械或人工将预应力筋牵入孔道就位。

8.2.8 由于后张无粘结预应力筋的工作特性，《无粘结预应力混凝土结构技术规程》（JGJ92）还规定进行动载锚固性能试验、疲劳锚固性能试验、油脂防腐性能试验，并要求达到规定的指标。

8.2.9 后张预应力筋张拉与控制：

1 张拉控制：采用千斤顶张拉，容易拉到控制张拉力，但若弹性伸长小

于设计值，预示预应力筋的摩阻系数高于设计值，摩阻损失较大，未能达到设计的预应力效果；因此除张拉力控制外，同时还应对弹性伸长进行控制。

2 单根预紧：预应力筋通常由多根钢绞线或钢丝集束组成，若一开始便集束张拉，由于各根钢绞线或钢丝处于不同的松弛状态，会因受力不均而断丝；因此在整束张拉前，采取单根预紧，以便集束张拉时，应力较均匀，可在很大程度上避免断丝；单根预紧力不宜超过控制拉力的 25%可供参考。

3 张拉分批：预应力筋张拉过程在产生环向预压应力的同时，对衬砌还将产生纵向拉应力，为避免预应力筋张拉过程，导致纵向拉应力超限，研究表明合理分批张拉可避免纵向拉应力超限，因此应通过合理分批张拉方案，以避免为此采取纵向预应力措施。

4 张拉分序：分批张拉方案确定后，每束预应力筋宜分两序张拉，以便观察张拉过程预留槽端壁和周围有无裂缝发生，通常第一序拉到设计张拉力的 60%~70%，第二序再拉到设计张拉力；若第一序张拉便发生裂缝或异常情况，需首先检查千斤顶工作是否正常，分析原因，妥善处理，方可决定是否继续进行下一序次的张拉，以策安全。

8.2.10 张拉完毕后应及时回填预留槽，并对槽壁凿毛，对于后张有粘结预应力筋，应尽快对孔道采取真空灌浆；对于无粘结预应力筋，应采取防腐措施，国内某工程排沙隧道采用无粘结预应力系统，未对预留槽槽壁凿毛处理，包裹钢绞线的油脂在重力作用向下流淌，并沿预留槽槽壁接缝溢到隧道内表面，对绞线防腐很不利，经多次处理，最后通过对槽壁采用严格的防渗措施，方解决油脂外泄问题。

9 防水设计

9.1 一般规定

9.1.1 从结构特点、使用要求和结构安全，输水隧道防水与交通隧道防水不尽相同，不仅需防外水渗入洞内，还需防止内水外渗至洞外，冲蚀围土，影响隧道整体稳定。仅就接缝防水而言，为防外水内渗，一般只需在管片的外侧设置防水密封垫，对于单层衬砌的有压输水隧道，当内水压力较高时，还需防内水外渗。上海青草沙输水隧道，洞内中心水头约 34.5m，算至洞底并考虑水锤，最大内压水头 41.22m，由于内压较高，在管片的内侧再设了一道防水密封垫。此外对防水等级的选用，则应满足设计使用年限、环境条件和耐久性的要求。

9.1.2 应当说现行国家标准《地下工程防水技术规范》（GB50108）主要是防外水的，在没有更合适的标准情况下，只能按该技术规范关于防水等级的描述，结合工程的重要性、设计使用年限 100 年等要求，选用不小于三级的防水标准；但同时要求结合单层衬砌和双层衬砌的结构特点、使用要求，本着结构安全，采取相应的防水措施。

9.1.3 输水隧道作为水工建筑物，就设计而言，隧道衬砌本体防水与所承受的水头、水力梯度、排水条件、水质条件，以及渗水的危害程度有关；因此按摘自《水工混凝土结构设计规范》SL 191 的表 3.4.6 规定设定防水要求。

9.1.4 工程采用的防水材料特性在《地下工程防水技术规范》（GB50108）中均有明确的要求，其中施工进场检验十分必要，是防止假冒伪劣混入工程的重要环节，因此强调应按《地下防水工程质量验收规范》（GB50208）的规定进行质量检查与验收。

9.2 单层衬砌防水设计

9.2.1 本条对单层衬砌结构的防水规定，就管片本体防水、管片接缝防水和

螺栓孔防水等项目而言，与交通隧道的管片防水无明显不同，但防水标准与防水措施应按本规程规定执行。

9.2.2 单层衬砌结构除了防外水渗入外，还要防高压内水外渗，而接缝是其主要的渗漏途径，因此对接缝防水效果尤应重视，因此列举与此有关的几项规定：

1 密封垫的水密性试验：考虑到橡胶材料性能随着时间的蜕变，要求密封条的止水性能达到 2 倍设计水压；批量出厂前应通过水压试验抽查。

2 对于埋深变化较大的长大隧道，随着地下水压和内水压的减小，有条件按分段对内部防水构造或材质作相应调整，但应达到设防 2 倍水压的规定。

3 为防止封闭块拼装损伤接缝密封垫，对其两侧缝面宜使用减摩剂，一旦发现有损坏，轻则就地修补，重则拆下重新调换、粘贴，以确保管片接缝密封防水性能。

4 在管片角隅处加贴自粘性橡胶薄片，可避免管片拼装硬接触，通过缓冲作用防止角缘损伤，影响密封垫防水效果。

5 嵌缝采用聚硫密封膏、聚氨酯密封膏等柔性防水材料，是为增强防水性能的措施，由于施工工艺的差异，与接缝两侧混凝土脱开情况时有发生，应做好相应的检查。

9.2.3 对螺栓孔防水不能掉以轻心，因为在密封垫失效和管片不良拼装部位，都会从螺栓孔发生渗漏；采用防水材料垫圈，套于螺栓，依靠紧固螺栓达到防止渗漏是常规的防水措施，但须注意，在全部拼装完毕后，有的螺栓往往会松动，因此全部螺栓均需重新拧紧。

9.2.4 无机防水涂层应具有：①良好的耐水性、耐久性、耐腐蚀性及耐菌性；②无毒、难燃、低污染；③良好的湿干粘结性、耐磨性和抗刺穿性。

9.2.5 盾构隧道与工作井的永久接头最有可能产生不均匀沉降，在所设置大变形缝中，所采取的防水措施应能适应较大变形，防止受损。

9.3 双层衬砌防水设计

9.3.1 双层衬砌结构的外衬为拼装式管片环，除应执行单层衬砌结构有关防水设计规定外，尚应执行本节有关防水设计规定。

9.3.2 结构缝是双层衬砌内衬渗漏的主要途径，特别是复合式和分离式双层衬砌，当内水渗至界面，而界面排水不畅通时，高压内水将对外衬受力十分不利，因此结构缝防水除应按常规布置紫铜止水片外，尚应由外向内加设遇水膨胀橡胶止水条，并视防水效果采用聚脲或聚硫密封胶封闭缝口；对于采用遇水膨胀类防水定型制品，在出厂、运输和存放时必须做好防潮包装，并在专门库房内存放，以免失效。施工安装前应根据防水要求，涂上缓膨剂，以避免过早膨胀，影响防水效果。

9.3.3 紫铜止水片通常由中间呈圆弧形的鼻子和两翼构成，鼻子用于适应结构缝两侧的变形；施工实践表明，当锚固两翼的混凝土浇筑不密实时，最易发生渗漏；在先浇段施工时，鼻子若浇筑在混凝土中，对变形的适应能力将大大降低，容易撕裂，失去止水作用，因此正确埋设十分重要，务要位置准确、固定牢靠，以防浇筑时偏移或变形。

9.3.4 结构缝的施工工艺与其防水质量密切相关，因此施工人员应由受过专业培训人员操作，持证上岗；聚硫密封膏施工时应选用口径合适的挤出嘴，均匀嵌填；对于聚脲施工可根据工程条件采用喷涂聚脲或手刮聚脲。

9.3.5 对结构缝止水效果采用加压检查，应选用最高内水压力，配备相应的加压设备，采用水压或气压进行检查。

10 抗震设计

10.1 一般规定

10.1.1~10.1.3 本条主要规定了盾构法输水隧道对地震的设防标准及其地震危险性的评价要求。我国目前仍以地震烈度作为各类工程抗震设防依据的基本指标。现行的《中国地震烈度区划图》给出的 50 年期限内，一般场地条件下，可能遭遇超越概率 10% 的地震基本烈度作为一般工程项目抗震设防的依据。但对于重大的盾构法输水隧道，一旦遭受重大震害而失事，修复困难，后果严重，因此，须在基本烈度基础上提高 1 度作为设计烈度。

10.1.5 设计烈度为 6 度时，抗震计算通常不会起控制作用，但是对于重大盾构法输水隧道尚应采取适当的抗震构造措施。

10.1.6 由于地震会首先引起场地变形，从而加剧其破坏；进、出口竖井及与其相连接的洞段，砂性地层且埋藏较浅的洞身段，或为地基条件不均匀、或为刚度突变地段，均是抗震不利部位，均应验算抗震强度及稳定性。

10.1.7 在基本烈度 8 度或高于 8 度的竖向地震作用下，背靠山坡的岸坡式进水口、岸塔式进水口和出水口为地面建筑物，抗滑安全系数有所降低，进、出口竖井及与其相连接的洞段等结构其竖向轴力不可忽略，因此本规程规定需作抗震验算的部位，均应考虑竖向地震作用。

10.1.8 在工程抗震设计中，与烈度对应的设计地震加速度代表值的取值，直接影响抗震设防的标准和基本建设投资。现有资料统计结果表明，烈度和峰值加速度的统计关系具有很大的离散性。因此，设计烈度对应的设计地震加速度代表值实质上是这一抗震设计基本参数的设计标准。地下结构受地震的影响主要来自结构周围岩土介质在地震传播经过时的变形，作用于结构上的地震惯性力可直接传递到结构周围岩土介质上。

10.1.9 位于设计烈度 8、9 度地震区的重大输水隧道，为震后评估和指导震后检修，应提出强震观测设计。

10.3 衬砌抗震设计

10.3.1 考虑到目前建筑部门在钢筋混凝土结构抗震设计中，核算截面强度时采用的设计地震系数都为设计烈度对应值的 35%，因此，在按动力法确定地震作用效应时，也相应折减至 35%，以求统一。

10.3.2~10.3.3 震害调查表明，隧道埋藏深度越大震害越轻，因此设计烈度为 8、9 度强震地区的隧道，为避免或减轻震害的不利影响，宜选用埋深大的线路，同时在隧道的转弯段、分岔段、断面尺寸或地层突变的洞段应加密结构缝，并加强纵向钢筋布置，以满足结构变形和防水要求。