管道系统在正常工作状态下，不包括水锤压力在内的，作用在管内壁上的最大持续运行压力。

2.1.10 设计压力 design pressure

管道系统运行过程中，作用在管内壁上的最大瞬时压力，为管道工作压力与水锤压力之和。

2.1.11 阴极保护 cathodic protection

通过阴极极化降低腐蚀电位使金属腐蚀速率显著减小的电化学保护技术。

2.1.12 牺牲阳极 sacrificial anode

依靠自身腐蚀速率增加而为被保护构筑物提供保护电流的金属或合金。

2.1.13 极化电位 polarized potential

无 *IR* 降电位。不含保护电流或其他电流 *IR* 降所实测的构筑物对电解质电位。

2.2 主要符号

2.2.1 几何参数

A_c——管芯混凝土面积，不包括钢筒面积；

A_s——预应力钢丝总面积；

A_{sf}——最外层预应力钢丝面积；

A_{sj}——第 j 层预应力钢丝总面积；

A_y——钢筒面积；

b——管道计算宽度；

B_c——管道外径；

B_d——管道顶部沟槽宽度；

B_t——隧洞最大开挖宽度；

d_c——管道的竖向挠度；

D_i——管道内径；

d_s——预应力钢丝直径；

d_w——管道多层缠丝时两层预应力钢丝之间的净距离；

d_y——钢筒厚度；

d_{yi}——钢筒中心到管芯混凝土内表面的距离；

D_y——钢筒外径；

H——管道覆土厚度；

h_c——管芯厚度；

h_{ci}——管芯混凝土内层厚度；

h_{co}——管芯混凝土外层厚度；

H_e——管顶以上等沉降面的高度；

h_m——包括钢丝直径在内的保护层厚度；

$\overline{R}$——砂浆保护层中心半径；

t_1——成品管在野外环境中放置的时间；

t_2——成品管在埋地后至注水前放置的时间。

2.2.2 材料性能

c——开挖隧洞上部的土壤黏聚力；

E_c——管芯混凝土弹性模量设计值；

E_m——保护层砂浆弹性模量设计值；

E_s——预应力钢丝弹性模量设计值；

E_t——管芯混凝土弹性模量试验平均值；

E_y——钢筒弹性模量设计值；

$f_{cu,k}$——管芯混凝土抗压强度标准值；

$f_{m,k}$——保护层砂浆抗压强度标准值；

f'_c——管芯混凝土 28d 抗压强度设计值；

f'_m——保护层砂浆 28d 抗压强度设计值；

f_{su}——预应力钢丝最小抗拉强度标准值；

f_{sy}——预应力钢丝抗拉屈服强度设计值；

f'_t——管芯混凝土抗拉强度设计值；

f'_{tm}——保护层砂浆 28d 抗拉强度设计值；

f_{yy}——钢筒抗拉屈服强度设计值；

f^*_{yy}——钢筒抗拉强度设计值；

γ_c——混凝土单位重量标准值；

γ_f——水单位重量标准值；

γ_m——砂浆单位重量标准值；

γ_s——钢材单位重量标准值；

w——填土材料单位重量标准值。

2.2.3 荷载和荷载效应

F_{ci}，F_y，F_{co}，F_s，F_m——内层混凝土、钢筒、外层混凝土、预应力钢丝和保护层截面的轴力；

F_{sk}——管顶垂直土压力；

F_{tk}——管道侧向土压力；

G_{1k}——管道结构自重；

G_{wk}——管道内水重；

M_1——管顶或管底弯矩总和；

M_{1cap}——管顶或管底的抗弯能力；

M_2——管侧弯矩总和；

M_{2r}——管侧应力重分布引起的弯矩；

M_{ci}，M_y，M_{co}，M_s，M_m——内层混凝土、钢筒、外层混凝土、预应力钢丝和保护层截面的弯矩；

N_0——最终预应力时的轴力；

N_1——压力和外荷载在管底或管顶引起的轴力；

N_2——压力和外荷载在管侧引起的轴力；

N'_k——工作荷载加可变荷载条件下最大的极限轴力；

N_{sg}，N_{sy}——预应力钢丝中由应力 f_{sg} 和 f_{sy} 引起的轴力；

N_{yy}——PCCPE 钢筒内由应力 f_{yy} 引起的轴力；

P——设计压力；

P_0——抵消管芯最终预压应力所需的管道内水压力；

P_b——开裂压力；

P_{ek}——外水压力；

P_{ft}——现场试验压力；

P_g——由水力梯度产生的内水压力；

P'_k——最大极限压力；

P_s——由静水头产生的内水压力；

P_w——工作压力；

q——车辆荷载；

q_h——列车荷载；

q_v——汽车荷载；

s_k——雪荷载；

W_t——施工荷载；

s——埋地管收缩应变设计值；

s_1——钢筒内侧混凝土在体表比修正系数等于1.0时的收缩应变；

s_2——钢筒外侧混凝土在体表比修正系数等于1.0时的收缩应变；

s_{ci}——钢筒内侧混凝土的收缩应变；

s_{com}——钢筒外侧混凝土和保护层的收缩应变；

s_f——管道底拱的总沉降量；

s_g——天然地面的沉降量；

s_m——保护层的收缩应变；

s'_m——高度为B_c的边土柱的压应变；

ε_{ci}，ε_{co}，ε_{mi}，ε_{mm}，ε_{mo}——管芯混凝土内表面应变，管芯混凝土外表面应变，保护层砂浆内表面应变，保护层砂浆中部应变，保护层砂浆外表面的应变；

ε_{cr}——当应力为f_{cr}时的混凝土应变；

ε_k'——初裂时管芯混凝土的极限拉应变；

ε'_{km}——初裂时保护层砂浆的极限拉应变；

ε_s——预应力钢丝的应变；

ε_{sg}，ε_{sy}，ε_{su}——当应力为f_{sg}、f_{sy}和f_{su}时预应力钢丝的应变；

ε_t——管芯极限拉应变；

ε'_t——当应力为f'_t时管芯混凝土的弹性应变；

σ_r——PCCPE内层混凝土与钢筒之间的径向拉力；

当管径为 0.4～12m 时，谢才系数 C 按巴甫洛夫斯基公式（5.0.4-2）和式（5.0.4-3）计算：

$$C=\lambda\frac{1}{n}Re^{y} \tag{5.0.4-2}$$

$$y=2.5\sqrt{n}-0.13-0.75\sqrt{R}(\sqrt{n}-0.1) \tag{5.0.4-3}$$

谢才系数 C 也可按满宁公式（5.0.4-4）计算：

$$C=\frac{1}{n}R^{\frac{1}{6}} \tag{5.0.4-4}$$

式中 λ——沿程阻力系数；

n——粗糙系数，用离心法制造的内衬式预应力钢筒混凝土管取 0.013～0.014，用立式震捣法制造的埋置式预应力钢筒混凝土管取 0.010～0.0125；

Re——雷诺数。

5.0.5 局部水头损失应按式（5.0.5）计算：

$$h_m=\sum\zeta\frac{v^2}{2g} \tag{5.0.5}$$

式中 ζ——局部水头损失系数；

g——重力加速度，m/s^2。

6 管道结构计算

6.1 管道结构上的荷载（作用）

6.1.1 管道结构上的荷载（作用）应包括永久荷载、可变荷载和偶然荷载。

1 永久荷载包括管道结构自重、管道内水重、土压力、预加应力等。

2 可变荷载包括管道内水压力、车辆荷载、雪荷载、外水压力、施工荷载等。

3 偶然荷载为水锤荷载。

6.1.2 当进行管道结构计算时，管道结构上的荷载（作用）分项系数 γ_G 及 γ_Q 均应取 1.0；当进行管道及附属建筑物稳定计算和地基承载力验算时，管道结构上的荷载（作用）分项系数 γ_G 及 γ_Q 应按表 6.1.2－1 取用。常用材料单位重量标准值应按表 6.1.2－2 取用。

表 6.1.2－1 荷载（作用）分项系数表

荷载（作用）分类及名称		符号	作用分项系数
内水压力	工作压力	P_w	$\gamma_Q=1.0$
	设计压力 P（工作压力＋水锤压力）	$P_w+\Delta H_r$	工作压力 $\gamma_Q=1.0$ 水锤压力 $\gamma_Q=1.1$
	现场试验压力	P_{ft}	$\gamma_Q=1.0$
	由水力梯度产生的内水压力	P_g	$\gamma_Q=1.0$
	由静水压力产生的内水压力	P_s	$\gamma_Q=1.0$
管道结构自重		G_{1k}	$\gamma_G=1.05$（不利时） $\gamma_G=0.95$（有利时）
管道内水重		G_{wk}	$\gamma_G=1.0$
管顶垂直土压力		F_{sk}	$\gamma_G=1.1$（不利时） $\gamma_G=0.9$（有利时）
管道侧向土压力		F_{tk}	$\gamma_G=1.1$（不利时） $\gamma_G=0.9$（有利时）

恒压 30min，并进行外观检查，若无漏水现象，则水压试验合格。

11.3.11 管道水压试验进行允许渗水量值测定应符合下列规定：

1 允许渗水量值测定应在主试验阶段进行。压力升至试验压力后开始计时。每当压力下降及时向管道内补水，保持管道试验压力恒定，最大压降不超过 0.03MPa，恒压测试时间不小于 2h，并计量恒压时间内补入试验管段内的水量。

2 实测渗水量应按式（11.3.11-1）计算：

$$q=\frac{W}{TL} \tag{11.3.11-1}$$

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——从开始计时至保持恒压结束的时间，min；

L——试验管段的长度，km。

3 实测渗水量应不大于按式（11.3.11-2）计算的允许渗水量：

$$[q]=0.14\sqrt{D_i} \tag{11.3.11-2}$$

式中 $[q]$——允许渗水量，L/(min·km)；

D_i——管道内径，mm。

11.4 给水管道冲洗和消毒

11.4.1 给水管道并网运行前应进行冲洗与消毒，经水质检验达到标准后，方可允许并网通水投入运行。

11.4.2 给水管道冲洗与消毒应符合下列要求：

1 给水管道严禁取用污染水源进行水压试验与冲洗，施工管段处于污染水域较近时，应严格控制污染水进入管道；如不慎污染管道，应由水质检测部门对管道污染水进行化验，并按其要求在管道并网运行前进行冲洗与消毒。

2 管道冲洗与消毒应编制实施方案。

3 施工单位应在建设单位、管理单位的配合下进行冲洗与消毒。

4 冲洗时应避开用水高峰，冲洗流速不小于1.0m/s，并连续冲洗。

12 安全监测

12.0.1 压力管道级别根据所在工程的等别和建筑物的重要性，按 SL 252—2002 确定，凡属于下列情况之一者，应做安全监测：

1 1级、2级压力管道。

2 管径 $D_i \geqslant 3m$，或工作压力 $P_w \geqslant 1.0MPa$ 的3级压力管道，其所在工程的等别为Ⅱ等以上的。

12.0.2 对管径 $D_i < 3m$，或工作压力 $P_w < 1.0MPa$ 的3级压力管道以及4级、5级压力管道，需要根据工程建筑物级别、工程规模及其重要性，专门论证后确定是否做安全监测。

12.0.3 安全监测设计应遵循下列原则：

1 应在压力管道不同压力、不同型式、不同结构或有特殊要求的管段上分别设置安全监测断面。

2 安全监测断面位置应方便观测，具有良好的交通条件，宜相对集中，便于布置监测点和进行监测工作。同种监测项目宜选择2个或2个以上断面。宜建立集中自动监测站。监测设备和仪器元件应具有先进性、可靠性与耐久性。

3 预应力钢筒混凝土压力管道安全监测项目应纳入工程安全监测系统。

12.0.4 安全监测设计内容应包括：监测项目的确定、监测断面的选取、仪器元件和标志的确定、数据采集与处理系统的配置及提出原型监测技术要求等。

12.0.5 安全监测项目应根据压力管道的级别、结构特点和地质条件从下列各项中选取：

1 主要受力构件应力。

2 钢丝（钢筋）应力。

3 外包混凝土应力。

4 温度（水温、气温、管温、混凝土温和地温）。

5 内水压力。

6 外水压力。

7 土压力。

8 位移（镇墩、井室等的位移沉降）。

9 缝隙（管道与外围混凝土之间）。

10 混凝土裂缝。

11 流速。

12 含沙量。

13 水质分析。

14 渗漏水量。

15 腐蚀电位。

16 管道断丝。

17 其他。

12.0.6 施工期和运行期安全监测设备应采取有效的保护措施。重要的安全监测设备损坏后，应及时补设或改设其他监测设备。应设置必要的交通、照明等。

12.0.7 监测仪器设置后即应取得基准值，并开始监测，及时整理分析资料。

12.0.8 管道检测项目及检测频次可参照 DL/T 5178《混凝土坝安全监测技术规范》、SL 60《土石坝安全监测技术规范》和 DL/T 709《压力钢管安全检测技术规程》，并结合工程具体情况决定。

12.0.9 管道阴极保护系统监测与测试的内容项目应包括：管道极化电位、阳极接地电阻、牺牲阳极输出电流和管道干扰等。测试方法见表 12.0.9。阴极保护参数测量所用测量仪器设备，应符合 GB/T 21246 的相关要求。应对检测结果进行综合分析，判断预应力钢筒混凝土管道的阴极保护状况是否达到了阴极保护准则的要求。检测频次宜采用 1 年 1 次。

表 12.0.9　管道阴极保护测试项目及方法

测试项目	测试位置	测试目的	测试方法
管道极化电位	测试点	管道保护基本参数	探头断电法
阳极工作电流	测试点	管道保护基本参数	万用表最大电流档
阳极接地电阻	测试点	管道保护原始基本参数	三级法或两级法
土壤电阻率	沿管线有代表性的位置、并保证至少 1 处/km	简单判别土壤腐蚀性	Wenner 四极法，极间距等于管顶、管底标高
管道干扰电位（交流电压）	干扰段	判断是否需要采取防护措施	万用表及参比电极
管道干扰电位（直流电位）			

12.0.10　管道敷设后宜沿管道走向埋设金属示踪线，距管顶不小于 0.3m 处宜埋设警示带，警示带上应标出醒目的提示字样。

13 工 程 验 收

13.1 一 般 规 定

13.1.1 管道工程验收应符合 GB 50268 的相关规定。

13.1.2 管道工程质量检验与评定按照《水利水电工程施工质量检验与评定规程》进行项目划分，可（宜）分为单位工程、分部工程、单元（工序）工程等三级。管道工程质量检验方法应符合《单元工程评定标准》的有关规定。管道工程验收工作的分类、组织和程序按照 SL 223 的规定执行。

13.1.3 管道工程施工现场管理应有相应的施工技术标准、健全的质量管理体系、施工质量控制和质量检验制度。

13.1.4 施工使用的预应力钢筒混凝土管的质量应符合设计、本标准及相关规范的要求。

13.1.5 土石方与地基处理质量验收标准应符合 GB 50268 的有关规定。

13.2 管 道 安 装

13.2.1 管道接口连接应符合下列规定：

1 管、配件、异形管及橡胶圈的产品质量应符合本标准及 GB/T 19685 的有关规定。检查方法应包括检查产品质量保证资料和检查成品管进场验收记录。

2 管道接口的橡胶圈位置正确，无扭曲、外露现象；承口、插口无破损、开裂；双道橡胶圈的接口水压试验合格。检查方法包括观察、用探尺检查；检查接口水压试验记录。

3 管道接口的强度符合设计要求，不得有开裂、空鼓、脱落现象。检查方法包括观察、检查水泥砂浆、混凝土试块的抗压强度试验报告。

4 管道接口的安装位置应正确，应符合 10.4.3 条的规定。

检查方法包括逐个检查、用钢尺量测、检查施工记录。

5 管道接口的填缝应符合设计要求，密实、光洁、平整。检查方法包括观察、检查填缝材料的质量保证资料、配合比记录。

13.2.2 管道敷设应符合下列规定：

1 管道埋设深度、轴线位置应符合设计要求。检查方法包括检查施工记录、测量记录。

2 管道无结构贯通裂缝和明显缺损情况。检查方法包括观察，检查技术资料。

3 管道敷设安装应稳固，管道安装后应线形平直。检查方法包括观察，检查测量记录。

4 管道内应光洁平整，无杂物、油污；管道不得有渗水现象。检查方法包括观察，检查施工记录。

5 管道与井室洞口之间无渗漏水。检查方法包括逐井检查，检查施工记录。

6 阀件安装应牢固、严密，启闭灵活，与管道轴线垂直。检查方法包括观察，检查施工记录。

13.3 管道防腐及阴极保护

13.3.1 管件内防腐层应符合 GB 50268 的有关规定，管道外防腐层应对照产品标准和设计文件，检查产品质量保证资料、成品管进场验收记录；外防腐涂层的厚度、附着力、电阻及外观质量等应符合 8.4 节的规定。

13.3.2 管道阴极保护应符合下列规定：

1 管道阴极保护所用的材料、设备等应符合国家有关标准的规定和设计要求。检查方法包括对照产品相关标准和设计文件，检查产品质量保证资料；检查产品进场验收记录。

2 管道系统的电绝缘性、电连续性经检测满足阴极保护的要求。检查方法包括阴极保护施工前应全线检查，检查绝缘部位的绝缘测试记录、跨接线的连接记录，用万用表测跨线等的电连

续性。

3 阴极保护的系统参数测试至少应检测极化电位、极化值，并应满足 9.2 节的要求，测量方法参照 SY/T 0023 的规定。

4 管道系统中阳极、辅助阳极的安装应符合 9.3.4 条和 9.3.5 条的规定。检查方法包括逐个检查，用钢尺或经纬仪、水准仪测量。

5 所有连接点应按规定做好防腐处理，与管道连接处的防腐材料应与管道相同。检查方法包括逐个检查；检查防腐材料质量合格证明、性能检验报告；检查施工记录、施工测试记录。

6 阴极保护系统的测试装置及附属设施的安装应符合下列规定：

1）测试桩埋设位置应符合设计要求。

2）电缆、引线敷设应符合设计要求，所有引线应保持一定松弛度，并连接可靠牢固。

3）接线盒内各类电缆应接线正确，测试桩的舱门应启闭灵活、密封良好。

4）测试探头的材质应与被保护管道的材质相同，其制作尺寸、设置数量、埋设位置应符合设计要求，且宜靠近管道外壁砂浆表面，并避免与钢管件接触。

5）参比电极的选用、埋设深度应符合设计要求。

6）检查方法：逐个观察；检查测试记录和测试报告。

7 管道工程在交接、验收时，应同时准备好相关资料。

13.4 验 收 资 料

13.4.1 在成品管验收时，管道生产厂家应提供下列资料：

1 根据 GB/T 19685 中规定的出厂证明书及包含的相关资料。

2 钢材及钢丝的质量检验结果。

3 用于管道生产的水泥及骨料的质量检验结果。

4 每一钢筒试样检测结果。

5 管芯混凝土及保护层砂浆试验结果。

6 成品管三边承载试验及静水压力试验报告。

7 配件的焊接检测结果和砂浆、涂层的证明材料。

8 合同约定的其他材料。

13.4.2 下列隐蔽工程验收时，施工单位应提供质量检测报告、中间验收记录及施工记录资料：

1 管道及附属构筑物的地基和基础（包括土层及地下水）资料。

2 管道安装的位置及高程。

3 管道接口、密封橡胶圈及防腐层。

4 管道的镇墩的设置，以及弯头、三通等管件的连接及防腐情况。

5 管道回填土压实度。

6 交叉建筑物工程。

7 阴极保护设施的安装及测试。

8 建筑物的混凝土、钢筋等。

9 合同约定的其他项目。

13.4.3 工程竣工验收时，参建单位根据合同规定应提交下列资料：

1 竣工图及设计变更文件。

2 材料、制品和设备的出厂质量证明书和检验记录。

3 混凝土、砂浆、防腐、防水及焊接检验记录。

4 管道安装的检验记录。

5 中间验收记录及有关资料。

6 管道的水压试验记录。

7 安全监测设施安装及测试记录。

8 工程质量检验评定记录。

9 工程质量事故处理记录。

10 给水管道的冲洗及消毒记录。

附录 A　管顶垂直土压力计算

A.0.1　PCCP 管道的主要敷设方式为地下埋管，也用于顶管和隧洞内穿管。管道敷设形式见图 A.0.1。

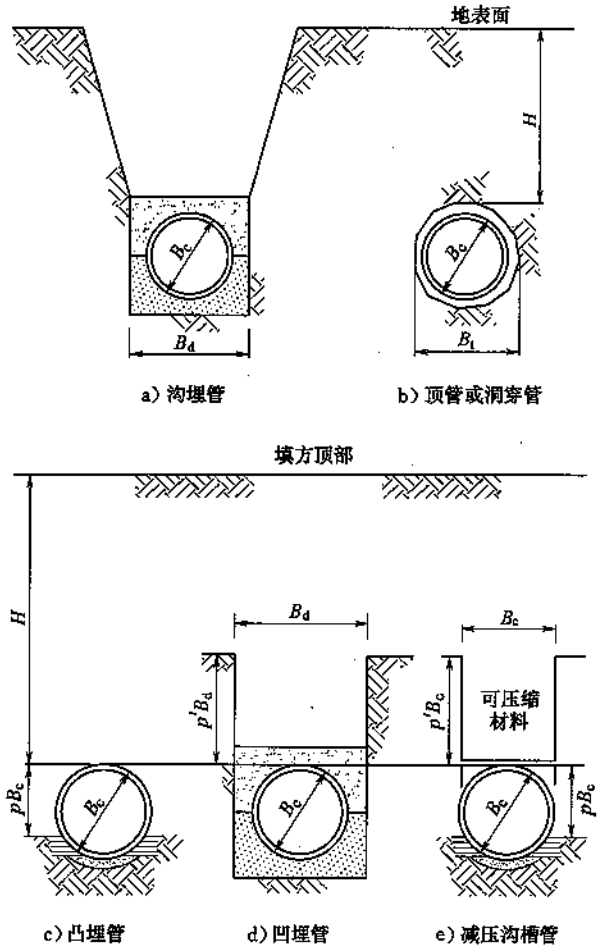


图 A.0.1　各类管道敷设形式和基本特点

1　地下埋管的管顶垂直土压力与其埋设方式有关，埋管可分为沟埋管和上埋管，上埋管又分为凸埋管、凹埋管和减压沟槽管。

2　沟埋管应首先进行沟槽宽度判别，当沟槽宽度 B_d 小于过渡沟槽宽度 B'_d 时，按沟埋管计算其管顶垂直土压力；当沟槽宽度 B_d 大于等于过渡沟槽宽度 B'_d 时，按凸埋管计算其管顶垂直土压力。过渡沟槽宽度 B'_d 即管道承受凸埋管管顶垂直土压力时对应的沟埋管沟槽宽度。

A.0.2　沟埋管指敷设在未扰动的较狭窄沟槽内，再用土回填至原地面的管道。沟埋管管顶垂直土压力应按式（A.0.2-1）和式（A.0.2-2）计算：

$$F_{sk}=C_d w B_d^2 \qquad \text{(A.0.2-1)}$$

$$C_d=\frac{1-e^{-2K\mu'\left(\frac{H}{B_d}\right)}}{2K\mu'} \qquad \text{(A.0.2-2)}$$

其中

$$K=\tan\left(45°-\frac{\phi'}{2}\right)$$

$$\mu'=\tan\phi'$$

式中　F_{sk}——管顶垂直土压力，kN/m；

C_d——沟槽荷载系数；

w——填土材料单位重量标准值，kN/m^3；

B_d——管道顶部沟槽宽度，m；

e——自然对数的底；

K——主动侧向单位压力与垂直单位压力的比值；

ϕ'——回填材料与沟槽土间的摩擦角；

μ'——回填材料与沟槽壁的摩擦系数；

H——管顶以上填土厚度，m。

各种土的 $K\mu'$ 乘积建议值见表 A.0.2。

表 A.0.2　各种土的 $K\mu'$ 乘积建议值

土的种类	无黏性颗粒材料	砂砾料最大值	饱和表土最大值	非饱和黏土最大值	饱和黏土最大值
$K\mu'$	0.1924	0.1650	0.1500	0.1300	0.1100
注：当土壤特性指标不确定时 $K\mu'$ 取 0.15。					

A.0.3　凸埋管指管顶凸出天然地表面或已压实填土表面，再用土覆盖的管道。凸埋管和宽沟埋管道（B_d 大于过渡沟槽宽度）的管顶垂直土压力应按式（A.0.3-1）～式（A.0.3-4）计算：

$$F_{sk}=C_c\omega B_c^2 \tag{A.0.3-1}$$

$$\left.\begin{aligned} C_c&=\frac{e^{\pm 2K\mu\left(\frac{H}{B_c}\right)}-1}{\pm 2K\mu} \quad H\leqslant H_e \text{ 时}\\ C_c&=\frac{e^{\pm 2K\mu\left(\frac{H_e}{B_c}\right)}-1}{\pm 2K\mu}+\left[\left(\frac{H}{B_c}\right)-\left(\frac{H_e}{B_c}\right)\right]e^{\pm 2K\mu\left(\frac{H_e}{B_c}\right)} \quad H>H_e \text{ 时}\end{aligned}\right\} \tag{A.0.3-2}$$

式中　C_c——凸埋管道荷载系数；

B_c——管道外径或沟槽宽度，取较大者，m；

μ——土壤内摩擦系数；

H_e——管顶以上等沉降面的高度，m；

±——符号“+”用于凸埋管，符号“-”用于沟埋管。

对于各种土的 $K\mu$ 一般与 $K\mu'$ 取值相同，在 0.05～0.19 之间，在土壤特性指标不确定时 $K\mu$ 取 0.19。

为估算式（A.0.3-2）中的 H_e 值，需要在数值上确定管道挠度和管道正上方填土柱与相邻土体间相对沉降量的关系。这一相互关系定义为沉降比，用式（A.0.3-3）表示：r_{sd} 的推荐设计值见表 A.0.3。

$$r_{sd}=\frac{(s'_m+s_g)-(s_f+d_c)}{s'_m} \tag{A.0.3-3}$$

式中　r_{sd}——沉降比；

s'_m——高度为 pB_c 的边土柱的压应变，m；

s_g——天然地面的沉降量，m；

s_f——管道底拱的总沉降量，m；

d_c——管道的竖向挠度，m。

等沉降面高度的计算公式为：

$$\left[\frac{1}{2K\mu}\pm\left(\frac{H}{B_c}-\frac{H_e}{B_c}\right)\pm\frac{r_{sd}p}{3}\right]\frac{e^{\pm 2K\mu\left(\frac{H_e}{B_c}\right)}-1}{\pm 2K\mu}\pm\frac{1}{2}\left(\frac{H_e}{B_c}\right)^2$$

$$\pm\frac{r_{sd}p}{3}\left(\frac{H}{B_c}-\frac{H_e}{B_c}\right)e^{\pm 2K\mu\left(\frac{H_e}{B_c}\right)}-\frac{1}{2K\mu}\cdot\frac{H_e}{B_c}\mp\frac{H}{B_c}\cdot\frac{H_e}{B_c}=\pm r_{sd}p\frac{H}{B_c}$$

（A.0.3-4）

式中 p——凸出比，即管顶凸出原状地面的高度与管道外径 B_c 的比值。

表 A.0.3 沉降比 r_{sd} 设计值

管道敷设及基础条件		沉降比 r_{sd}	
		常用范围	设计值
凸埋管（取值范围 0～1.0）	岩石或非沉陷性土壤	1.0	1.0
	普通土壤	0.5～0.8	0.7
	沉陷性土壤	0～0.5	0.3
零凸埋管	—	—	0.0
凹埋管（取值范围－1.0～0）	$p'=0.5$	—	－0.1
	$p'=1.0$	—	－0.3
	$p'=1.5$	—	－0.5
	$p'=2.0$	—	－1.0
减压沟槽管（取值范围－2.0～0.0）	$p'=0.5$	—	－0.5
	$p'=1.0$	—	－0.7
	$p'=1.5$	—	－1.0
	$p'=2.0$	—	－2.0

注 1：沉降比的数值取决于管道两侧相邻回填材料的压实度。若采用能将垫层和两侧回填材料适当压实的施工方法，则沉降比设计值推荐采用 0.5（刚性管道）和 0.3（半刚性管道）。

注 2：p'为凹入比，为管顶凹入原状地面的深度与沟槽宽度 B_d 的比值。

A.0.4 凹埋管指管道敷设在较浅的沟槽内，管顶处于原状地面或已压实填土表面之下，后覆盖的填土表面高于原状地面或已压实填土表面的管道。凹埋管管顶垂直土压力应按式（A.0.4-1）～式（A.0.4-6）计算：

$$F_{sk}=C_n w B_d^2 \tag{A.0.4-1}$$

$$\begin{cases} C_n=\dfrac{e^{-2K\mu\left(\frac{H}{B_d}\right)}-1}{-2K\mu} & H\leqslant H_e \text{ 时} \\ C_n=\dfrac{e^{-2K\mu\left(\frac{H_e}{B_d}\right)}-1}{-2K\mu}+\left[\left(\dfrac{H}{B_d}\right)-\left(\dfrac{H_e}{B_d}\right)\right]e^{-2K\mu\left(\frac{H_e}{B_d}\right)} & H>H_e \text{ 时} \end{cases} \tag{A.0.4-2}$$

H_e 应按式（A.0.4-3）计算：

$$\frac{e^{-2K\mu\left(\frac{H'_e}{B_d}\right)}-1}{-2K\mu}\left(\frac{H'}{B_d}-\frac{H'_e}{B_d}-\frac{1}{2K\mu}\right)-\frac{H'_e}{B_d}\left[\left(\frac{H'}{B_d}-\frac{H'_e}{B_d}\right)+\frac{1}{2}\frac{H'_e}{B_d}-\frac{1}{2K\mu}\right]$$

$$=\frac{2}{3}r_{sd}p'\left[\frac{e^{-2K\mu\left(\frac{H'_e}{B_d}\right)}-1}{-2K\mu}+\left(\frac{H'}{B_d}-\frac{H'_e}{B_d}\right)e^{-2K\mu\left(\frac{H'_e}{B_d}\right)}\right] \tag{A.0.4-3}$$

$$r_{sd}=\frac{s_g-(s_d+s_1+d_c)}{s_d} \tag{A.0.4-4}$$

$$H'=H-p'B_d \tag{A.0.4-5}$$

$$H'_e=H_e-p'B_d \tag{A.0.4-6}$$

式中 C_n——凹埋管道荷载系数；

s_d——从原地表面到管顶间土体的沉降量，m。

A.0.5 减压沟槽管指最初是以凸埋管形式敷设，当回填土填筑到比管顶位置高出至少一倍管径的高度时，在管道上部挖一个宽度为管外径的沟槽，然后再用压缩性更大的材料回填该沟槽，模拟凹埋管的敷设条件的管道。减压沟槽管管顶垂直土压力应按式（A.0.5-1）和式（A.0.5-2）计算：

$$F_{sk}=C_i w B_c^2 \tag{A.0.5-1}$$

$$\begin{cases} C_i = \dfrac{e^{-2K\mu\left(\frac{H}{B_c}\right)} - 1}{-2K\mu} & H \leqslant H_e \text{ 时} \\ C_i = \dfrac{e^{-2K\mu\left(\frac{H_e}{B_c}\right)} - 1}{-2K\mu} + \left[\left(\dfrac{H}{B_c}\right) - \left(\dfrac{H_e}{B_c}\right)\right] e^{-2K\mu\left(\frac{H_e}{B_c}\right)} & H > H_e \text{ 时} \end{cases} \quad \text{(A. 0. 5 - 2)}$$

式中 C_i——减压沟槽荷载系数；

H_e——管顶以上等沉降面的高度，按式（A. 0. 4 - 3）～式（A. 0. 4 - 6）计算，m。

A. 0. 6 顶管或隧洞内穿管管顶垂直土压力按式（A. 0. 6 - 1）和式（A. 0. 6 - 2）计算：

$$F_{sk} = C_t \omega B_t^2 - 2cC_t B_t \quad \text{(A. 0. 6 - 1)}$$

$$C_t = \frac{1 - e^{-2K\mu\left(\frac{H}{B_t}\right)}}{2K\mu} \quad \text{(A. 0. 6 - 2)}$$

式中 C_t——洞穿管或顶管荷载系数；

B_t——隧洞最大开挖宽度，m；

c——开挖隧洞上部的土壤黏聚力，kN/m^2；

H——顶管管顶或隧洞顶上部覆盖层厚度，m。

附录 B　地面车辆荷载计算

B. 0. 1　公路荷载计算应符合下列规定：

1　公路荷载对管道上的作用包括地面行驶的各种车辆，其载重等级、规格形式应根据地面运行要求确定。

2　地面车辆荷载传递到埋地管道顶部的竖向压力标准值，可按下列方法确定：

1）单个轮压传递到管道顶部的竖向压力标准值（见图 B. 0. 1－1）可按式（B. 0. 1－1）计算：

$$q_{vk}=\frac{\mu_d Q_{vi,k}}{(a_i+1.4H)(b_i+1.4H)} \qquad \text{(B. 0. 1-1)}$$

式中　q_{vk}——轮压传递到管顶处的竖向压力标准值，kN/m^2；

$Q_{vi,k}$——车辆的第 i 个车轮承担的单个轮压标准值，kN；

a_i——第 i 个车轮的着地分布长度，m；

b_i——第 i 个车轮的着地分布宽度，m；

H——自车行地面至管顶的深度，m；

μ_d——动力系数，可按表 B. 0. 1 采用。

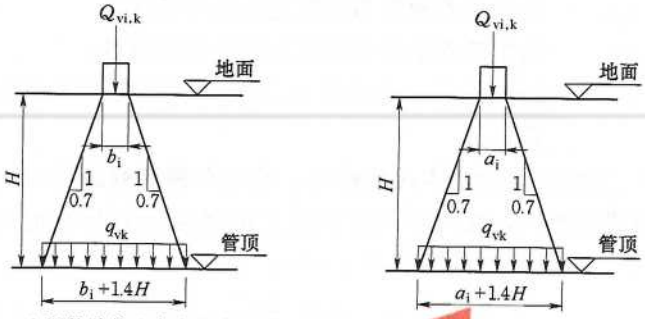
表 B. 0. 1　动力系数 μ_d

地面至管顶的距离/m	0. 25	0. 30	0. 40	0. 50	0. 60	≥0. 70
动力系数 μ_d	1. 30	1. 25	1. 20	1. 15	1. 05	1. 00

2）两个以上单排轮压综合影响传递到管道顶部的竖向压力标准值（见图 B. 0. 1－2）可按式（B. 0. 1－2）计算：

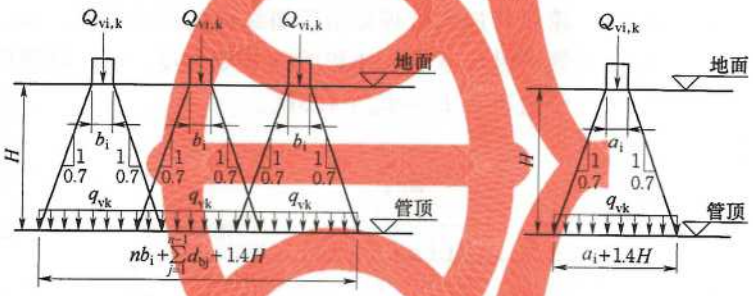
$$q_{vk}=\frac{\mu_d n Q_{vi,k}}{(a_i+1.4H)\left(nb_i+\sum_{j=1}^{n-1}d_{bj}+1.4H\right)} \qquad \text{(B. 0. 1-2)}$$

式中　n——车轮的总数量；



a）顺轮胎着地宽度的分布　　b）顺轮胎着地长度的分布

图 B.0.1-1　单个轮压的传递分布图



a）顺轮胎着地宽度的分布　　b）顺轮胎着地长度的分布

图 B.0.1-2　两个以上单排轮压综合影响的传递分布图

d_{bj}——沿车轮着地分布宽度方向，相邻两个车轮间的净距，m。

3）多排轮压综合影响传递到管道顶部的竖向压力标准值可按式（B.0.1-3）计算：

$$q_{vk}=\frac{\mu_d\sum_{i=1}^{n}Q_{vi,k}}{\left(\sum_{i=1}^{m_a}a_i+\sum_{j=1}^{m_a-1}d_{aj}+1.4H\right)\left(\sum_{i=1}^{m_b}b_i+\sum_{j=1}^{m_b-1}d_{bj}+1.4H\right)} \tag{B.0.1-3}$$

式中 m_a——沿车轮着地分布宽度方向的车轮排数；

m_b——沿车轮着地分布长度方向的车轮排数；

d_{xj}——沿车轮着地分布长度方向，相邻两个车轮间的净距，m。

3 当刚性管为整体式结构时，地面车辆荷载的影响应考虑结构的整体作用，此时作用在管道上的竖向压力标准值可按式（B.0.1-4）计算（见图 B.0.1-3）：

$$q_{ve,k}=q_{vk}\frac{L_p}{L_e} \tag{B.0.1-4}$$

式中 $q_{ve,k}$——考虑管道整体作用时管道上的竖向压力，kN/m^2；

L_p——轮压传递到管顶处沿管道纵向的影响长度，m；

L_e——管道纵向承受轮压影响的有效长度，m，对圆形管道可取 $L_e=L_p+1.5D_i$。

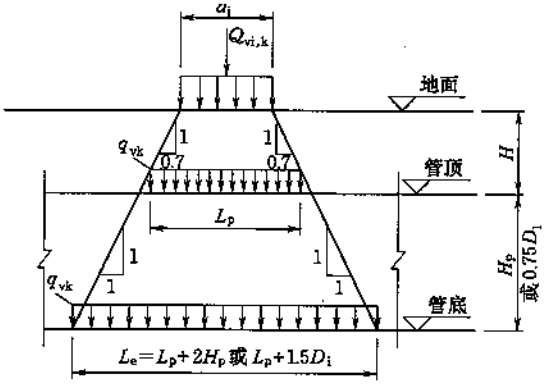


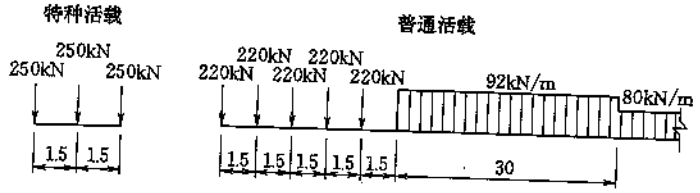
图 B.0.1-3 考虑结构整体作用时车辆荷载的竖向压力传递分布

4 当地面设有刚性混凝土地面时，可不计地面车辆轮压对下部埋设管道的影响，但应计算路基施工时运料车辆和碾压机械的轮压作用影响，计算公式同式（B.0.1-1）或式（B.0.1-2）。

5 地面运行车辆的载重、车轮布局、运行排列等应符合JTG D60的规定。

B.0.2 铁路荷载计算应符合下列规定：

1 铁路列车竖向静活载应采用中华人民共和国铁路标准活载，即“中—活载”。标准活载的计算图式见图B.0.2。设计采用“中—活载”加载时，标准活载计算图式可任意截取。



图B.0.2 “中—活载”图式（尺寸单位：m）

2 计算活载对管道的竖向压力和水平压力时，假定活载在轨底平面上的横向分布宽度为2.5m，其在路基内与竖直线成一角度（正切为0.5）向外扩散，压力应按式（B.0.2-1）和式（B.0.2-2）计算：

水平压力：

$$e=\xi q_h \tag{B.0.2-1}$$

竖向压力：

$$q_h=\frac{165}{2.5+h} \tag{B.0.2-2}$$

式中 e，q_h——压力，kPa；

ξ——系数，填土采用0.25或0.35，视设计的控制情况采用，经久压实的路面采用0.25；

h——轨底以下的深度，m。

3 列车竖向活载包括列车竖向动力作用，该列车竖向活载等于列车竖向静活载乘以动力系数$(1+\mu)$，其动力系数应按式（B.0.2-3）计算：

1）管顶上填土厚度$h\geqslant 1$m（从轨底算起）时，不计列车竖向动力作用。

2）当 $h<1\text{m}$ 时：

$$1+\mu=1+\alpha\left(\frac{6}{30+L}\right) \qquad \text{(B.0.2-3)}$$

其中 $$\alpha=4(1-h)\leqslant 2$$

式中 L——除承受局部活载管道为影响线加载长度外，其余均为桥梁跨度，m。

B.0.3 如管道使用单位有要求，施工临时荷载应采用管道使用单位确定的荷载及覆土要求按上述公路活载计算方法进行计算。

附录 C　弯矩和轴力修正系数表

C. 0. 1　管体弯矩和轴力修正系数宜取下列数值：

1　管顶垂直土压力（管基：90°）：$C_{m1e}=0.1247$，$C_{m2e}=0.0885$，$C_{n1e}=0.3255$，$C_{n2e}=0.5386$。

2　管自重（管基：15°）：$C_{m1p}=0.2157$，$C_{m2p}=0.1016$，$C_{n1p}=0.1029$，$C_{n2p}=0.3026$。

3　流体重量（管基：90°）：$C_{m1f}=0.1208$，$C_{m2f}=0.0878$，$C_{n1f}=-0.2703$，$C_{n2f}=-0.0617$。

C. 0. 2　管体其他管基角的弯矩和轴力修正系数取值见表 C. 0. 2-1 和表 C. 0. 2-2。

表 C. 0. 2-1　弯矩修正系数

管体基础支承角	管顶			管侧			管底		
	管顶垂直土压力	管内水重	管自重	管顶垂直土压力	管内水重	管自重	管顶垂直土压力	管内水重	管自重
0°	0.0610	0.0796	0.0796	0.0823	0.1020	0.1020	0.2122	0.2387	0.2387
15°	0.0616	0.0793	0.0793	0.0829	0.1016	0.1016	0.1910	0.2157	0.2157
30°	0.0624	0.0785	0.0785	0.0837	0.1004	0.1004	0.1733	0.1941	0.1941
45°	0.0636	0.0773	0.0773	0.0847	0.0984	0.0984	0.1582	0.1739	0.1739
60°	0.0650	0.0755	0.0755	0.0858	0.0957	0.0957	0.1454	0.1550	0.1550
75°	0.0666	0.0731	0.0731	0.0871	0.0922	0.0922	0.1343	0.1374	0.1374
90°	0.0686	0.0703	0.0703	0.0885	0.0879	0.0879	0.1247	0.1208	0.1208
105°	0.0708	0.0670	0.0670	0.0899	0.0828	0.0828	0.1162	0.1054	0.1054
120°	0.0733	0.0632	0.0632	0.0912	0.0770	0.0770	0.1089	0.0911	0.0911
135°	0.0761	0.0590	0.0590	0.0925	0.0705	0.0705	0.1024	0.0778	0.0778
150°	0.0793	0.0542	0.0542	0.0936	0.0634	0.0634	0.0966	0.0654	0.0654
165°	0.0829	0.0491	0.0491	0.0944	0.0556	0.0556	0.0915	0.0540	0.0540
180°	0.0870	0.0435	0.0435	0.0947	0.0474	0.0474	0.0870	0.0435	0.0435

表 C.0.2-2 轴力修正系数

管体基础支承角	管顶			管侧			管底		
	管顶垂直土压力	管内水重	管自重	管顶垂直土压力	管内水重	管自重	管顶垂直土压力	管内水重	管自重
0°	0.5756	−0.2387	−0.0796	0.7189	−0.0572	0.3029	0.4244	−0.3979	0.0796
15°	0.5270	−0.2382	−0.0791	0.6715	−0.0573	0.3026	0.3976	−0.3746	0.1029
30°	0.4868	−0.2367	−0.0775	0.6329	−0.0577	0.3015	0.3759	−0.3523	0.1252
45°	0.4532	−0.2341	−0.0749	0.6015	−0.0584	0.2997	0.3586	−0.3307	0.1467
60°	0.4251	−0.2304	−0.0713	0.5759	−0.0593	0.2972	0.3447	−0.3100	0.1675
75°	0.4015	−0.2257	−0.0665	0.5552	−0.0604	0.2940	0.3338	−0.2899	0.1876
90°	0.3816	−0.2198	−0.0607	0.5386	−0.0616	0.2900	0.3255	−0.2703	0.2071
105°	0.3650	−0.2129	−0.0537	0.5256	−0.0630	0.2852	0.3195	−0.2513	0.2262
120°	0.3511	−0.2047	−0.0456	0.5157	−0.0645	0.2798	0.3155	−0.2326	0.2449
135°	0.3398	−0.1953	−0.0362	0.5084	−0.0658	0.2735	0.3135	−0.2141	0.2634
150°	0.3306	−0.1847	−0.0255	0.5036	−0.0671	0.2665	0.3133	−0.1958	0.2816
165°	0.3235	−0.1726	−0.0135	0.5009	−0.0680	0.2587	0.3149	−0.1775	0.2999
180°	0.3183	−0.1592	0	0.5000	−0.0683	0.2500	0.3183	−0.1592	0.3183

附录 D　徐变和收缩参数

D.0.1　体表比修正系数应按式（D.0.1-1）和式（D.0.1-2）计算，体表比修正系数 $\gamma(h)$ 也可参照体表比取值，见表 D.0.1。

徐变体表比修正系数：

$$\gamma(h)=\frac{2}{3}(1+1.13e^{-0.0213h}) \qquad (D.0.1-1)$$

收缩应变体表比修正系数：

$$\gamma'(h)=1.2e^{-0.00472h} \qquad (D.0.1-2)$$

式中　h——厚度，mm。

表 D.0.1　徐变和收缩应变体表比修正系数表

体表比/mm	徐变 $\gamma(h)$	收缩 $\gamma'(h)$
25	1.09	1.06
38	1.00	1.00
51	0.92	0.94
76	0.81	0.84
102	0.75	0.74
127	0.72	0.66
152	0.70	0.58
203	0.68	0.46
254	0.67	0.36

D.0.2　ϕ_1，ϕ_2，s_1 及 s_2 的值取决于管道制造完成后室外存放的时间 t_1（d）、存放环境的相对湿度 RH、埋地至第一次充水的时间间隔 t_2（d）。当 $t_1=270$d，$t_2=90$d 时，$RH=70\%$ 和 $RH=40\%$时的取值见表 D.0.2；$RH>70\%$时，按 $RH=70\%$取值；$RH<40\%$时，按 $RH=40\%$取值；介于两者之间时，通过内插

法取值。

表 D.0.2　徐变和收缩参数取值表

参数	浇筑混凝土		离心混凝土	
	$RH=70\%$	$RH=40\%$	$RH=70\%$	$RH=40\%$
ϕ_1	1.76	2.12	1.06	1.27
ϕ_2	1.79	2.14	—	—
s_1	184×10^{-6}	262×10^{-6}	111×10^{-6}	157×10^{-6}
s_2	299×10^{-6}	377×10^{-6}	—	—

当 $t_1\neq270$d 或 $t_2\neq90$d 时，浇筑混凝土的 ϕ_1、ϕ_2、s_1、s_2 值应按式（D.0.2-1）～式（D.0.2-4）计算，其余 RH 值的参数值通过插值法得出：

$$\phi_1=2.35\left[\frac{\rho-0.65}{1+10/t_1^{0.6}}+\frac{0.05}{1+10/(t_1+t_2)^{0.6}}+0.6\right] \tag{D.0.2-1}$$

$$\phi_2=2.35\left(\frac{\rho-0.65}{1+10/t_1^{0.6}}+0.65\right) \tag{D.0.2-2}$$

$$s_1=312\times10^{-6}\left[\frac{(\rho'-0.225)t_1}{t_1+55}+\frac{0.225(t_1+t_2)}{t_1+t_2+55}\right] \tag{D.0.2-3}$$

$$s_2=780\times10^{-6}\left[\frac{(0.4\rho'-0.09)t_1}{t_1+55}+0.225\right] \tag{D.0.2-4}$$

式中　ϕ_1——钢筒内侧混凝土在体表比修正系数等于 1.0 时的徐变系数；

ϕ_2——钢筒外侧混凝土在体表比修正系数等于 1.0 时的徐变系数；

s_1——钢筒内侧混凝土在体表比修正系数等于 1.0 时的收缩应变；

s_2——钢筒外侧混凝土在体表比修正系数等于 1.0 时的收缩应变；

t_1——成品管在野外环境中放置的时间，d；

t_2——成品管在埋地后至注水前放置的时间，d；

ρ——徐变相对湿度修正系数，当 $RH=70\%$ 时，$\rho=0.8$；当 $RH=40\%$ 时，$\rho=1.0$；

ρ'——收缩相对湿度修正系数，当 $RH=70\%$ 时，$\rho'=0.7$；当 $RH=40\%$ 时，$\rho'=1.0$。

注：离心混凝土的 ϕ_1、ϕ_2、s_1、s_2 的数值为浇筑混凝土计算值的 60%。

D.0.3 徐变系数函数应按式（D.0.3-1）～式（D.0.3-4）计算：

$$\phi_{ci}=\phi_1\gamma(h_{ci}) \tag{D.0.3-1}$$

$$\phi_{com}=\phi_2\gamma(h_{co}+h_m) \tag{D.0.3-2}$$

$$\phi_m=\phi_2\gamma(h_m) \tag{D.0.3-3}$$

$$\phi=\frac{(h_{co}+h_m)\phi_{com}-h_m\phi_m+h_{ci}\phi_{ci}}{h_{ci}+h_{co}} \tag{D.0.3-4}$$

式中 h_{ci}——管芯混凝土内层厚度，mm；

h_{co}——管芯混凝土外层厚度，mm；

ϕ_{ci}——钢筒内侧混凝土的徐变系数；

ϕ_{com}——钢筒外侧混凝土和保护层的徐变系数；

ϕ_m——保护层的徐变系数；

ϕ_1——钢筒内侧混凝土在体表比修正系数等于 1.0 时的徐变系数；

ϕ_2——钢筒外侧混凝土在体表比修正系数等于 1.0 时的徐变系数。

注：徐变验证实验需要对徐变系数和收缩应变的设计值适当增大，则将 ϕ 值乘以修正系数 C_ϕ。

D.0.4 收缩应变函数应按式（D.0.4-1）～式（D.0.4-4）计算：

$$s_{ci}=s_1\gamma'(h_{ci}) \tag{D.0.4-1}$$

$$s_{com}=s_2\gamma'(h_{co}+h_m) \tag{D.0.4-2}$$

$$s_m = s_2 \gamma'(h_m) \qquad \text{(D. 0. 4-3)}$$

$$s = \frac{(h_{co} + h_m) s_{com} - h_m s_m + h_{ci} s_{ci}}{h_{ci} + h_{co}} \qquad \text{(D. 0. 4-4)}$$

式中 s_{ci}——钢筒内侧混凝土的收缩应变；

s_{com}——钢筒外侧混凝土和保护层的收缩应变；

s_m——保护层的收缩应变；

s——地埋管收缩应变设计值；

s_1——钢筒内侧混凝土在体表比修正系数等于 1.0 时的收缩应变；

s_2——钢筒外侧混凝土在体表比修正系数等于 1.0 时的收缩应变。

注：收缩应变的验证实验需要对收缩应变的设计值适当增大，则将 s 值乘以修正系数 C_s。

D. 0. 5 钢丝应力松弛应按下列规定计算：

1 采用符合 GB/T 5223 规定的固有松弛的钢丝，在预拉应力为 $0.75 f_{su}$ 时，单层配筋的钢丝松弛系数应按式（D. 0. 5-1）和式（D. 0. 5-2）计算：

浇筑混凝土：

$$R = 0.111 - 3.5\left(\frac{A_s}{A_c}\right) \qquad \text{(D. 0. 5-1)}$$

离心混凝土：

$$R = 0.132 - 3.1\left(\frac{A_s}{A_c}\right) \qquad \text{(D. 0. 5-2)}$$

2 采用符合 GB/T 5223 规定的固有松弛的钢丝，在预拉应力为 $0.75 f_{su}$ 时，多层配筋的钢丝松弛系数应按式（D. 0. 5-3）～式（D. 0. 5-6）计算：

浇筑混凝土：

$$R_1 = 0.113 - 5.8\left[0.64\frac{A_{sl}}{A_c} + 0.36\left(\frac{A_s}{A_c} - \frac{A_{sl}}{A_c}\right)\right] \qquad \text{(D. 0. 5-3)}$$

$$R_f = 0.127 - 5.0\left[0.17\left(\frac{A_s}{A_c} - \frac{A_{sf}}{A_c}\right) + 0.83\,\frac{A_{sf}}{A_c}\right] \tag{D.0.5-4}$$

离心混凝土：

$$R_1 = 0.101 - 2.5\left[0.65\,\frac{A_{s1}}{A_c} + 0.35\left(\frac{A_s}{A_c} - \frac{A_{s1}}{A_c}\right)\right] \tag{D.0.5-5}$$

$$R_f = 0.127 - 2.5\left[0.06\left(\frac{A_s}{A_c} - \frac{A_{sf}}{A_c}\right) + 0.94\,\frac{A_{sf}}{A_c}\right] \tag{D.0.5-6}$$

式中 R_1——第1层预应力钢丝松弛系数；

R_f——最外层预应力钢丝松弛系数；

A_{s1}——第1层预应力钢丝面积，mm^2/m；

A_{sf}——最外层预应力钢丝面积，mm^2/m。

3 采用高于GB/T 5223规定的固有松弛的钢丝，在预拉应力为$0.75f_{su}$时，单层配筋的钢丝松弛系数应按式（D.0.5-7）和式（D.0.5-8）计算：

浇筑混凝土：

$$R = -0.035 + 0.146C_R - (0.95 + 2.55C_R)\left(\frac{A_s}{A_c}\right) \tag{D.0.5-7}$$

离心混凝土：

$$R = 0.004 + 0.128C_R - (2.01 + 1.09C_R)\left(\frac{A_s}{A_c}\right) \tag{D.0.5-8}$$

4 采用高于GB/T 5223规定的固有松弛的钢丝，在预拉应力为$0.75f_{su}$时，多层配筋的钢丝松弛系数应按式（D.0.5-9）～式（D.0.5-12）计算：

浇筑混凝土：

$$R_1 = 0.044 + 0.069C_R - 5.8\left[0.64\,\frac{A_{s1}}{A_c} + 0.36\left(\frac{A_s}{A_c} - \frac{A_{s1}}{A_c}\right)\right] \tag{D.0.5-9}$$

$$R_f = 0.050 + 0.077C_R - 5.0\left[0.17\left(\frac{A_s}{A_c} - \frac{A_{sf}}{A_c}\right) + 0.83\,\frac{A_{sf}}{A_c}\right]$$

(D. 0. 5 - 10)

离心混凝土：

$$R_l = 0.032 + 0.069C_R - 2.5\left[0.65\,\frac{A_{sl}}{A_c} + 0.35\left(\frac{A_s}{A_c} - \frac{A_{sl}}{A_c}\right)\right]$$

(D. 0. 5 - 11)

$$R_f = 0.050 + 0.077C_R - 2.5\left[0.06\left(\frac{A_s}{A_c} - \frac{A_{sf}}{A_c}\right) + 0.94\,\frac{A_{sf}}{A_c}\right]$$

(D. 0. 5 - 12)

附录 E　极限状态计算方法

E. 0. 1　最大极限压力应按式（E. 0. 1 - 1）和式（E. 0. 1 - 2）计算：

对 PCCPE：

$$P'_k = P_0 \min\left(\frac{0.5\varepsilon'_{km}}{\varepsilon_{cr}},\ 1+\frac{0.41\sqrt{f'_c}}{f_{cr}}\right) \quad \text{(E. 0. 1 - 1)}$$

对 PCCPL：

$$P'_k = P_0 \min\left(\frac{0.5\varepsilon'_{km}}{\varepsilon_{cr}},\ 1+\frac{0.25\sqrt{f'_c}}{f_{cr}}\right) \quad \text{(E. 0. 1 - 2)}$$

E. 0. 2　最大轴力 N'_k 应按式（E. 0. 2）计算：

$$N'_k = \frac{1}{2} D_y P'_k \quad \text{(E. 0. 2)}$$

E. 0. 3　管道的开裂压力应按式（E. 0. 3）计算：

$$P_b = 2\frac{A_y f^*_{yy} + A_s f_{su}}{D_y} \quad \text{(E. 0. 3)}$$

E. 0. 4　PCCPE 承受弯矩 M_1 时，管底或管顶内层混凝土与钢筒之间的最大径向拉力应按式（E. 0. 4 - 1）～式（E. 0. 4 - 6）计算：

$$\begin{cases} \sigma_r = \dfrac{h_{ci}}{D_y} f'_t (1+v_2)\left(2-\dfrac{\lambda_y}{k}\right) & v_2 \leqslant 0 \\ \sigma_r = \dfrac{h_{ci}}{D_y} f'_t \left[2-\dfrac{v_2}{v}(2-\lambda)\right] & \lambda \leqslant 1 \text{ 且 } v_2 > 0 \end{cases} \quad \text{(E. 0. 4 - 1)}$$

$$\begin{cases} \sigma_r = \dfrac{h_{ci}}{D_y} f'_t \left[2(1+v_2) - \dfrac{v_2}{v}\dfrac{1}{\lambda}(1+v) - v_2\lambda\right] & \lambda > 1 \text{ 且 } v_2 > 0 \\ \lambda = \dfrac{d_{yi}}{t_s} \text{ 或} \dfrac{h_c - d_{yi}}{t_s} \end{cases} \quad \text{(E. 0. 4 - 2)}$$

$$\lambda_y=\frac{d_{yi}}{h_c} \qquad \text{(E. 0. 4-3)}$$

$$v=\frac{\varepsilon'_k}{\varepsilon'_t}-1=10 \qquad \text{(E. 0. 4-4)}$$

$$v_2=\frac{\varepsilon_{co}}{\varepsilon'_t}-1 \text{ 或} \frac{\varepsilon_{ci}}{\varepsilon'_t}-1 \qquad \text{(E. 0. 4-5)}$$

$$v_m=\frac{\varepsilon_{km}}{\varepsilon'_{tm}}-1=7 \qquad \text{(E. 0. 4-6)}$$

当 $v_2=\frac{\varepsilon_{ci}}{\varepsilon'_t}-1$，取值范围为$-1\sim10$，$k$ 值的计算可通过 E. 0. 6 条描述的方法利用管子承受弯矩和轴力时所计算得到的应力和应变而求得。

E. 0. 5 从管道内壁至预压轴力 N_0 的作用线之间的距离 e_0 应按式（E. 0. 5-1）计算：

$$e_0=h_c\frac{0.5bh_c+nA_s(1+\lambda_s)+(n'-1)A_y\lambda_y}{bh_c+nA_s+(n'-1)A_y} \qquad \text{(E. 0. 5-1)}$$

从管道内壁至由压力和外荷载作用引起的组合荷载轴力 N 的作用线之间的距离 e 应按式（E. 0. 5-2）计算：

$$e=h_c\frac{0.5bh_c+(n-m)A_s(1+\lambda_s)+(n'-1)A_y\lambda_y+mbh_m(1+\lambda_m)}{bh_c+(n-m)A_s+(n'-1)A_y+mbh_m} \qquad \text{(E. 0. 5-2)}$$

其中 $$n=\frac{E_s}{E_c},\ n'=\frac{E_y}{E_c},\ \lambda_m=\frac{h_m}{2h_c}$$

浇筑混凝土和离心混凝土的 m 应按式（E. 0. 5-3）计算：

$$\begin{cases} m=\dfrac{E_m}{E_c} & -\varepsilon_{mm}\leqslant\varepsilon'_{tm} \\ m=\dfrac{E_m}{7E_c}\left(8\dfrac{\varepsilon'_{tm}}{-\varepsilon_{mm}}-1\right) & \varepsilon'_{tm}<-\varepsilon_{mm}<\varepsilon'_{km} \\ m=0 & -\varepsilon_{mm}\geqslant\varepsilon'_{km} \end{cases} \qquad \text{(E. 0. 5-3)}$$

ε_{mm}指由轴力 N_i 引起的砂浆保护层的应变，其值应按式

（E.0.5-4）～式（E.0.5-8）计算：

$$\varepsilon_{mm}=-\frac{N_i}{E_c[bh_c+(n-m)A_s+(n'-1)A_y+mbh_m]}\quad i=1,\ 2 \tag{E.0.5-4}$$

当采用多层缠丝时：

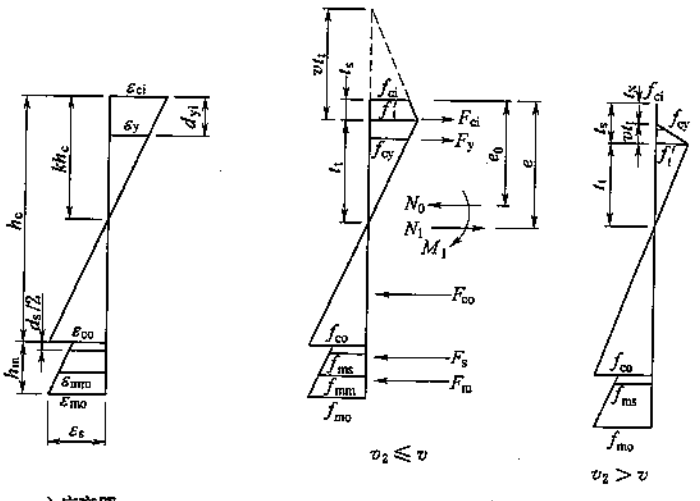
$$A_s=\sum A_{sj} \tag{E.0.5-5}$$

$$A_s(1+\lambda_s)=\sum A_{sj}(1+\lambda_{sj}) \tag{E.0.5-6}$$

$$\lambda_s=\frac{d_s}{2h_c} \tag{E.0.5-7}$$

$$\lambda_{sj}=\frac{\left(j-\frac{1}{2}\right)d_s+(j-1)\,d_w}{h_c} \tag{E.0.5-8}$$

E.0.6 管壁应力和应变的计算及极限弯矩的计算应按本条给出的下列公式和方法进行，并满足所有的极限状态设计准则。



a）应变图　　b）应力图

图 E.0.6-1　管底和管顶管壁横截面应变和应力分布解析图

注：$t_1=\frac{1}{1+v_2}kh_c$，$t_s=v_2t_1$，$t_x=(v_2-v)\,t_1$，$\lambda=\frac{d_{yi}}{t_s}$

1　管底和管顶的工作性极限状态的荷载组合条件下各应变、应力、弯矩和轴力（见图 E.0.6－1）应按表 E.0.6－1 及式（E.0.6－1）～式（E.0.6－24）计算：

表 E.0.6－1　管底和管顶的管壁横截面应变和应力分布

应变公式	应力公式	适用条件
$\varepsilon_{ci}=(1+v_2)\varepsilon'_t$	$f_{ci}=(1+v_2)f'_t$	$v_2\leqslant 0$
	$f_{ci}=\left(1-\frac{v_2}{v}\right)f'_t$	$0<v_2\leqslant v$
	$f_{ci}=0$	$v_2>v$
$\Delta\varepsilon_y=\varepsilon_{ci}\left(1-\frac{\lambda_y}{k}\right)$	$\Delta f_y=nf'_t(1+v_2)\left(1-\frac{\lambda_y}{k}\right)$	
	$f_{cy}=f'_t(1+v_2)\left(1-\frac{\lambda_y}{k}\right)$	$v_2\leqslant 0$ 或 $\lambda\geqslant 1$
	$f_{cy}=f_t\left[1-\frac{v_2}{v}(1-\lambda)\right]$	$0<v_2\leqslant v$ 且 $\lambda<1$ 或 $v_2>v$ 且 $1-\frac{v}{v_2}<\lambda<1$
	$f_{cy}=0$	$v_2>v$ 且 $\lambda\leqslant 1-\frac{v}{v_2}$
$\varepsilon_{co}=\varepsilon_{ci}\left(\frac{1}{k}-1\right)$	$f_{co}=f'_t(1+v_2)\left(\frac{1}{k}-1\right)$	
$\Delta\varepsilon_s=\varepsilon_{ci}\left(\frac{1+\lambda_s}{k}-1\right)$	$\Delta f_s=nf'_t(1+v_2)\left(\frac{1+\lambda_s}{k}-1\right)$	
	$f_{ms}=m\left[f'_t(1+v_2)\left(\frac{1+\lambda_s}{k}-1\right)-f_{cr}\right]$	
$\varepsilon_{mm}=\varepsilon_{ci}\left(\frac{1+\lambda_m}{k}-1\right)-\varepsilon_{cr}$	$f_{mm}=m\left[f'_t(1+v_2)\left(\frac{1+\lambda_m}{k}-1\right)-f_{cr}\right]$	
$\varepsilon_{mo}=\varepsilon_{ci}\left(\frac{1+2\lambda_m}{k}-1\right)-\varepsilon_{cr}$	$f_{mo}=m\left[f'_t(1+v_2)\left(\frac{1+2\lambda_m}{k}-1\right)-f_{cr}\right]$	

注：砂浆和混凝土的弹性模量比 m 应按式（E.0.5－3）计算，式中 ε_{mm} 是由轴力 N_1 和弯矩 M_1 组合作用引起的砂浆保护层的应变。

计算后得到对应的应力应变值后，要验算轴力和弯矩的平衡等式是否能得到满足。

$\sum F=0$，即：

$$N_0-N_1=F_{ci}+F_y+F_{co}+F_s+F_m \quad (E.0.6-1)$$

$$\begin{cases} F_{ci} = -\dfrac{1}{2}bkh_c(1+v_2)f'_t & v_2 \leqslant 0 \\ F_{ci} = F'_{ci} + F''_{ci} = -\dfrac{1}{2}bt_t(1+v)f'_t + \dfrac{1}{2}bt_t(v-v_2)f_{ci} & 0 < v_2 < v \\ F_{ci} = F'_{ci} = -\dfrac{1}{2}bt_t(1+v)f'_t & v_2 \geqslant v \end{cases}$$

(E. 0. 6 - 2)

$$F_y = -A_y(\Delta f_y - f_{cy}) \qquad \text{(E. 0. 6 - 3)}$$

$$F_{co} = \frac{bh_c}{2}(1-k)f_{co} \qquad \text{(E. 0. 6 - 4)}$$

$$F_s = A_s(\Delta f_s - f_{ms}) \qquad \text{(E. 0. 6 - 5)}$$

$$F_m = F'_m + F''_m \qquad \text{(E. 0. 6 - 6)}$$

$$F'_m = \frac{1}{2}bh_m m(f_{co} - f_{cr}) \qquad \text{(E. 0. 6 - 7)}$$

$$F''_m = \frac{1}{2}bh_m f_{mo} \qquad \text{(E. 0. 6 - 8)}$$

钢丝中心$\sum M=0$，也即：

$$M_1 - N_0[(1+\lambda_s)h_c - e_0] + N_1[(1+\lambda_s)h_c - e] = M_{ci} + M_y + M_{co} + M_m$$

(E. 0. 6 - 9)

其中

$$\begin{cases} M_{ci} = -F_{ci}h_c\left(1+\lambda_s-\dfrac{k}{3}\right) & v_2 \leqslant 0 \\ M_{ci} = -F'_{ci}\left\{(1+\lambda_s)h_c - t_t\left(v_2+\dfrac{1-v}{3}\right)\right\} - F''_{ci}\left\{(1+\lambda_s)h_c + t_t\dfrac{v-v_2}{3}\right\} & 0 < v_2 \leqslant v \\ M_{ci} = -F'_{ci}\left\{(1+\lambda_s)h_c - t_t\left(v_2+\dfrac{1-v}{3}\right)\right\} & v_2 > v \end{cases}$$

(E. 0. 6 - 10)

$$M_y = -F_y h_c(1+\lambda_s-\lambda_y) \qquad \text{(E. 0. 6 - 11)}$$

$$M_{co} = -F_{co}h_c\left(\frac{1-k}{3}+\lambda_s\right) \qquad \text{(E. 0. 6 - 12)}$$

$$M_m = F'_m h_c\left(\frac{2\lambda_m}{3}-\lambda_s\right)+F''_m h_c\left(\frac{4\lambda_m}{3}-\lambda_s\right)$$

(E.0.6-13)

当管子采用多层缠丝时（$f=2$ 或 3），本节前述的 $\Delta\varepsilon_s$、Δf_s、f_{sr}、F_s 和 A_s 表达式均为外层预应力钢丝的参数，而中间钢丝的参数应按式（E.0.6-14）计算：

$$\lambda_{sj}=\frac{(2j-1)d_s+2(j-1)d_w}{2h_c}\qquad j=1,\ \cdots,\ f$$

(E.0.6-14)

式中 d_w——管道多层缠丝时两层预应力钢丝之间的净距离。

对第 j 层预应力钢丝，钢丝应变 ε_{sj} 应按式（E.0.6-15）和式（E.0.6-16）计算：

$$\varepsilon_{sj}=\Delta\varepsilon_{sj}-\frac{f_{scj}-nf_{cr}}{E_s}\qquad\text{(E.0.6-15)}$$

$$\Delta\varepsilon_{sj}=\Delta\varepsilon_s\left(1-\frac{\lambda_{sf}-\lambda_{sj}}{\lambda_{sl}+k'}\right)\qquad\text{(E.0.6-16)}$$

式中 $\Delta\varepsilon_s$——外层预应力钢丝的应变。

第 j 层预应力钢丝的应力 f_{sj} 应按式（E.0.6-17）计算：

$$\begin{cases} f_{sj}=\varepsilon_{sj}E_s & \varepsilon_{sj}\leqslant\dfrac{f_{sg}}{E_s} \\ f_{sj}=f_{su}\left\{1-\left[1-0.6133\left(\dfrac{\varepsilon_{sj}E_s}{f_{su}}\right)\right]^{2.25}\right\} & \varepsilon_{sj}>\dfrac{f_{sg}}{E_s} \end{cases}$$

(E.0.6-17)

相应的在式（E.0.6-1）中：

$$F_s=\sum_{j=1}^{f}F_{sj}\qquad\text{(E.0.6-18)}$$

$$F_{sj}=A_{sj}(\Delta f_{sj}-f_{msj})\qquad\text{(E.0.6-19)}$$

式中，Δf_{sj}和f_{msj}可采用λ_{sj}代替λ_s后的Δf_s和f_{ms}的计算式计算而得。

外层预应力钢丝中心弯矩M_s应由式（E.0.6-20）计算并在式（E.0.6-9）右边的$\sum M$中增加M_s：

$$M_s=-\sum_{j=1}^{f-1}F_{sj}h_c(\lambda_{sf}-\lambda_{sj}) \qquad \text{(E.0.6-20)}$$

式（E.0.6-9）中$N_1\leqslant N'_k$。当$N_1>N'_k$，M_1将不超过与钢筒弹性极限应力f_{yy}相对应的M_1极限弯矩，这使表6.4.2-1和表6.4.2-2规定的极限准则得到满足。利用在轴力N'_k产生的极限弯矩M_1和与不受外荷载引起钢筒屈服的轴力N_{yy}相对应的零弯矩的线性关系，在轴力N_1产生的极限弯矩M_1应采用内插法求得。

$$N_{yy}=A_c f_c(-\varepsilon_{cr}+\Delta\varepsilon_{yy})+A_y f_{yy}+\sum_{j=1}^{f}A_{sj}f_{sj}(\varepsilon_{srj}+\Delta\varepsilon_{yy}) \qquad \text{(E.0.6-21)}$$

$$\varepsilon_{cr}=\frac{f_{cr}}{E_c} \qquad \text{(E.0.6-22)}$$

$$\Delta\varepsilon_{yy}=\frac{f_{yr}+f_{yy}}{E_y} \qquad \text{(E.0.6-23)}$$

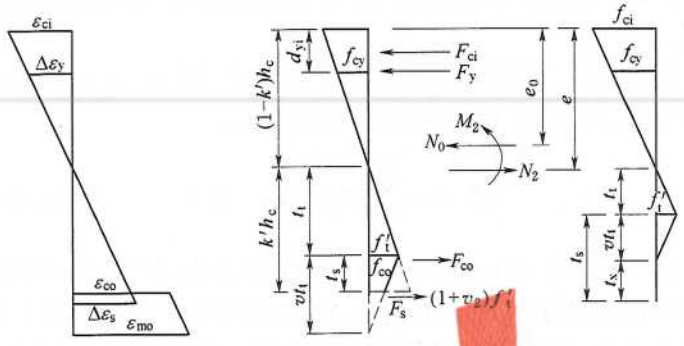
$$\varepsilon_{srj}=-\frac{f_{srj}}{E_s} \qquad \text{(E.0.6-24)}$$

式中 $f_c(-\varepsilon_{cr}+\Delta\varepsilon_{yy})$——混凝土产生塑性变形时的应力，在钢筒屈服时的应变计算得出；

$\Delta\varepsilon_{yy}$——钢筒屈服时的环向应变增量；

$f_{sj}(\varepsilon_{srj}+\Delta\varepsilon_{yy})$——第$j$层预应力钢丝的应力。

2 管侧的工作极限状态包括的荷载组合条件下的各应力、应变、轴力和弯矩（见图E.0.6-2）应按表E.0.6-2及式（E.0.6-25）～式（E.0.6-39）计算：



a）应变图　　b）应力图

图 E.0.6-2　管侧管壁横截面应变和应力分布解析图

注：$t_t=\dfrac{1}{1+v_2}k'h_c$，$t_s=vt_t$，$t_x=(v_2-v)t_t$，$\lambda=\dfrac{h_c-d_{yi}}{t_s}$

表 E.0.6-2　管侧的管壁横截面应变和应力分布

应变公式	应力公式	适用范围
$\varepsilon_{co}=(1+v_2)\varepsilon'_t$	$f_{co}=(1+v_2)f'_t$	$v_2\leqslant 0$
	$f_{co}=\left(1-\dfrac{v_2}{v}\right)f'_t$	$0<v_2\leqslant v$
	$f_{co}=0$	$v_2>v$
$\varepsilon_{ci}=\varepsilon_{co}\left(\dfrac{1}{k'}-1\right)$	$f_{ci}=(1+v_2)f'_t\left(\dfrac{1}{k'}-1\right)$	
$\Delta\varepsilon_y=\varepsilon_{co}\left(\dfrac{1-\lambda_y}{k'}-1\right)$	$\Delta f_y=n'(1+v_2)f'_t\left(\dfrac{1-\lambda_y}{k'}-1\right)$	
	$f_{cy}=(1+v_2)f'_t\left(\dfrac{1-\lambda_y}{k'}-1\right)$	$v_2\leqslant 0$ 或 $\lambda\geqslant 1$
	$f_{cy}=\left[\dfrac{v_2}{v}(1-\lambda)-1\right]f'_t$	$0<v_2\leqslant v$ 且 $\lambda<1$ 或 $v_2>v$ 且 $1-\dfrac{v}{v_2}\leqslant\lambda<1$
	$f_{cy}=0$	$v_2>v$ 和 $\lambda<1-\dfrac{v}{v_2}$

表 E.0.6-2（续）

应变公式	应力公式	适用范围
$\Delta\varepsilon_s=\varepsilon_{co}\left(1+\frac{\lambda_s}{k'}\right)$	$\Delta f_s=n(1+v_2)f'_t\left(1+\frac{\lambda_s}{k'}\right)$	$\Delta\varepsilon_s\leqslant\frac{f_{sg}+f_{sr}-nf_{cr}}{E_s}$
	$\Delta f_s=f_s(\varepsilon_s)+f_{sr}-nf_{cr}$	$\Delta\varepsilon_s>\frac{f_{sg}+f_{sr}-nf_{cr}}{E_s}$
$\varepsilon_s=\Delta\varepsilon_s-\frac{f_{sr}-nf_{cr}}{E_s}$		
$\varepsilon_{mo}=\varepsilon_{co}\left(1+\frac{2\lambda_m}{k'}\right)+\varepsilon_{cr}$		

注：$f_s(\varepsilon_s)$ 表示预应力钢丝的应力应变，用钢丝应力—应变函数公式代入 ε_s 进行计算。$f_s(\varepsilon_s)=\varepsilon_s E_s$，$\varepsilon_s\leqslant\frac{f_{sg}}{E_s}$；$f_s(\varepsilon_s)=f_{su}\left\{1-\left[1-0.6133\left(\frac{\varepsilon_s E_s}{f_{su}}\right)\right]^{2.25}\right\}$，$\varepsilon_s>\frac{f_{sg}}{E_s}$。

计算后得到对应的应力应变值后，要验算轴力和弯矩的平衡等式是否能得到满足。

$\sum F=0$，即：

$$N_0-N_2=F_{ci}+F_y+F_{co}+F_s \tag{E.0.6-25}$$

$$F_{ci}=\frac{1}{2}(1-k')bh_c f_{ci} \tag{E.0.6-26}$$

$$F_y=A_y(\Delta f_y-f_{cy}) \tag{E.0.6-27}$$

$$\begin{cases}F_{co}=-\frac{1}{2}bk'h_c(1+v_2)f'_t & v_2\leqslant 0\\ F_{co}=(F'_{co}+F''_{co}) & 0<v_2\leqslant v\\ F_{co}=-\frac{1}{2}bt_t(1+v)f'_t & v_2>v\end{cases} \tag{E.0.6-28}$$

$$F'_{co}=-\frac{1}{2}bt_t(1+v)f'_t \tag{E.0.6-29}$$

$$F''_{co}=\frac{1}{2}bt_t(v-v_2)f_{co} \tag{E.0.6-30}$$

$$F_s=-A_s\Delta f_s \tag{E.0.6-31}$$

钢丝中心 $\sum M=0$，也即：

$$M_2+N_0[(1+\lambda_s)h_c-e_0]-N_2[(1+\lambda_s)h_c-e]=M_{ci}+M_y+M_{co}$$

(E.0.6-32)

$$M_{ci}=F_{ci}\left[(1+\lambda_s)h_c-\frac{(1-k')h_c}{3}\right] \quad \text{(E.0.6-33)}$$

$$M_y=F_yh_c(1+\lambda_s-\lambda_y) \quad \text{(E.0.6-34)}$$

$$\begin{cases} M_{co}=F_{co}h_c(\lambda_s+\dfrac{k'}{3}) & v_2\leqslant 0 \\ M_{co}=F'_{co}\left[h_c\lambda_s+t_t\left(v_2+\dfrac{1-v}{3}\right)\right]+F''_{co}\left(h_c\lambda_s-t_t\dfrac{v-v_2}{3}\right) & 0<v_2\leqslant v \\ M_{co}=F_{co}\left[h_c\lambda_s+t_t\left(v_2+\dfrac{1-v}{3}\right)\right] & v_2>v \end{cases}$$

(E.0.6-35)

对于工作荷载准则，设定 $e=e_0$，该条件与管侧砂浆保护层的拉应力一样将被忽略。

当管子采用多层缠丝时（$f=2$ 或 3），与本条第 1 款相同的处理方法，但在等式（E.0.6-19）中：

$$F_{sj}=-A_{sj}\Delta f_{sj} \quad \text{(E.0.6-36)}$$

$$M_s=\sum_{j=1}^{f-1}F_{sj}h_c(\lambda_{sf}-\lambda_{sj}) \quad \text{(E.0.6-37)}$$

式中，Δf_{sj}的数值可采用 λ_{sj}，f_{sj}和 f_{srj}分别代替 λ_s，f_s，f_{sr}的计算式计算而得。

式（E.0.6-32）中 $N_2\leqslant N'_k$，当 $N_2>N'_k$，M_2 将不超过与外层预应力钢丝（$f=1$，2 或 3）弹性极限应力 f_{sg}和屈服强度 f_{sy}相对应的极限弯矩 M_2，这使规定的极限准则得到满足。利用在轴力 N'_k时的极限弯矩 M_2 和与不受外荷载时引起钢筒屈服的轴力 N_{sg}和钢筒在弹性极限应力下引起的轴力 N_{sy}相对应的零弯矩之间的线性关系，在轴力 N_2 时的极限弯矩 M_2 应采用内插法求得。

$$N_{sg}=A_c f_c(-\varepsilon_{cr}+\Delta\varepsilon_{sg})+A_y f_y(-\varepsilon_{yr}+\Delta\varepsilon_{sg})+\sum_{j=1}^{f}A_{sj}f_{sj}(\varepsilon_{srj}+\Delta\varepsilon_{sg})$$

(E.0.6-38)

$$N_{sy}=A_c f_c(-\varepsilon_{cr}+\Delta\varepsilon_{sy})+A_y f_y(-\varepsilon_{yr}+\Delta\varepsilon_{sy})+\sum_{j=1}^{f}A_{sj}f_{sj}(\varepsilon_{srj}+\Delta\varepsilon_{sy})$$

(E.0.6-39)

其中

$$\varepsilon_{yr}=\frac{f_{yr}}{E_y};\ \varepsilon_{srj}=\frac{-f_{srj}}{E_s}$$

$$\Delta\varepsilon_{sg}=\varepsilon_{sg}-\varepsilon_{srf}$$

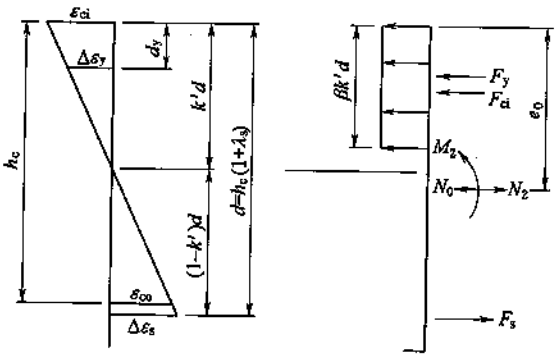
$$\Delta\varepsilon_{sy}=\varepsilon_{sy}-\varepsilon_{srf}$$

式中 $f_c(-\varepsilon_{cr}+\Delta\varepsilon_{sg})$，$f_y(-\varepsilon_{yr}+\Delta\varepsilon_{sg})$，$f_{sj}(\varepsilon_{srj}+\Delta\varepsilon_{sg})$——管芯混凝土、钢筒和第 j 层预应力钢丝的应力，分别由应力—应变相关曲线计算求得；

ε_{yr}，ε_{srj}——与第 j 层钢丝最终应力相对的钢丝拉应变；

$\Delta\varepsilon_{sg}$——环向应变增量。

3 管芯混凝土极限抗压强度时的极限弯矩值 M_2 中的应变、应力、弯矩和轴力（见图 E.0.6-3）应按表 E.0.6-3 及式（E.0.6-40）～式（E.0.6-48）计算：



a）应变图　　b）应力图

图 E.0.6-3 管芯混凝土极限抗压强度时极限弯矩 M_2 的应力应变解析图

表 E.0.6-3　管芯混凝土极限抗压强度时的极限弯矩 M_2 的应变和应力分布

应变公式	应力公式	适用范围
$\varepsilon_{ci}=0.003$	$f_{ci}=0.85f'_c$	
$\Delta\varepsilon_y=\varepsilon_{ci}\dfrac{k'-\dfrac{\lambda_y}{1+\lambda_s}}{k'}$	$f_{cy}=0.85f'_c$	$d_{yi}\leqslant\beta k'd$
	$f_{cy}=0$	$d_{yi}>\beta k'd$
	$\Delta f_y=E_y\Delta\varepsilon_y$	$\Delta f_y\leqslant f_{yy}-f_{yr}+n'f_{cr}$
$\Delta\varepsilon_s=\varepsilon_{ci}\dfrac{1-k'}{k'}$	$\Delta f_s=f_s(\varepsilon_s)+f_{sr}-nf_{cr}$	

表 E.0.6-3 中，$f_s(\varepsilon_s)$ 意味着预应力钢丝中应力应采用钢丝应力—应变函数式 f_s 并采用钢丝应变 ε_s 进行计算，并且：

$$\beta=0.85-0.05\left(\frac{145f'_c}{1000}-4\right),\quad f'_c\geqslant 27.6\text{MPa} \tag{E.0.6-40}$$

式中　β——管芯的宽度与受压区的宽度之比。

计算后得到对应的应力应变值后，要验算轴力和弯矩的平衡等式是否能得到满足。

$\sum F=0$，即：

$$N_0-N_2=F_{ci}+F_y+F_s \tag{E.0.6-41}$$

$$F_{ci}=b\beta k'd(0.85f'_c) \tag{E.0.6-42}$$

$$F_y=A_y(\Delta f_y-f_{cy}) \tag{E.0.6-43}$$

$$F_s=-\Delta f_sA_s \tag{E.0.6-44}$$

如果 $\Delta\varepsilon_s\geqslant\Delta\varepsilon_{su}=\dfrac{1.63f_{su}+f_{sr}-nf_{cr}}{E_s}$，则设 $\Delta f_s=f_{su}+f_{sr}-nf_{cr}$ 及 $\Delta\varepsilon_s=\Delta\varepsilon_{su}$，当 $\dfrac{f_{sg}}{E_s}<\varepsilon_s<\dfrac{163f_{su}}{E_s}$：

$$\Delta f_s=f_{su}\left[1-\left(1-0.6133\frac{\varepsilon_sE_s}{f_{su}}\right)^{2.25}\right]+f_{sr}-nf_{cr} \tag{E.0.6-45}$$

$$\varepsilon_{ci}=\frac{k'}{1-k'}\Delta\varepsilon_s$$

$$\Delta\varepsilon_y=\Delta\varepsilon_s\frac{k'-\frac{\lambda_y}{1+\lambda_s}}{1-k'}$$

钢丝中心$\sum M=0$，也即：

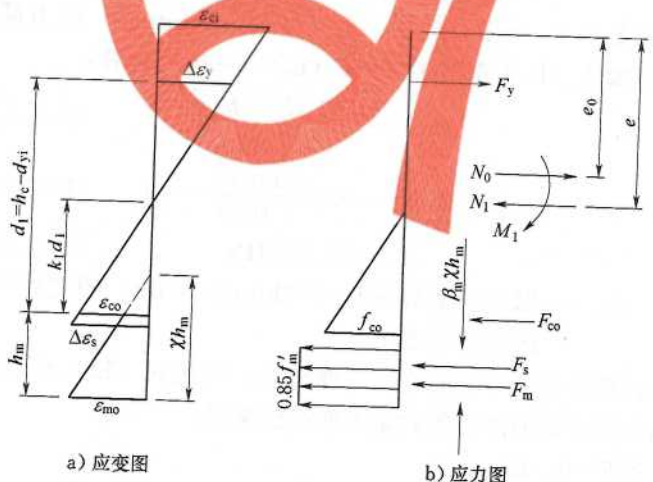
$$M_2+(N_0-N_2)[(1+\lambda_s)h_c-e_0]=M_{ci}+M_y \tag{E.0.6-46}$$

$$M_{ci}=F_{ci}d\left(1-\frac{\beta k'}{2}\right) \tag{E.0.6-47}$$

$$M_y=F_y(d-d_{yi}) \tag{E.0.6-48}$$

当管件采用多层缠丝时（$f=2$ 或 3），与本条第 2 款相同的处理方法，但 $\Delta\varepsilon_{sj}=\Delta\varepsilon_s\left(1-\frac{\lambda_{sr}-\lambda_{sj}}{\lambda_{sf}+k'}\right)$。

4 PCCPL 的保护层抗压强度极限弯矩 M_1 可按照本条给出的分析方法和本条中描述的弯矩重分布原理进行计算。此时的应变应力、弯矩和轴力（见图 E.0.6-4）应按表 E.0.6-4 及式（E.0.6-49）～式（E.0.6-64）计算：



a）应变图　　b）应力图

图 E.0.6-4　保护层极限抗压强度时计算所得的弯矩 M_1 的应力应变解析图

表 E.0.6-4　保护层极限抗压强度时的极限弯矩 M_1 的应变和应力分布

应变公式	应力公式	适用范围
$\varepsilon_{ci}=\frac{\varepsilon_{mo}+\varepsilon_{cr}}{k_1d_1+h_m}[(1-k_1)d_1+d_{yi}]$	$f_{ci}=0$	
$\Delta\varepsilon_y=\frac{\varepsilon_{mo}+\varepsilon_{cr}}{k_1d_1+h_m}(1-k_1)d_1$	$\Delta f_y=\frac{(1-k_1)d_1}{k_1d_1+h_m}n'(f_{cr}+E_c\varepsilon_{mo})$ $\leqslant f_{yy}+f_{yr}-n'f_{cr}$	
	$f_{cy}=f_{co}$	
$\varepsilon_{co}=\frac{\varepsilon_{mo}+\varepsilon_{cr}}{k_1d_1+h_m}k_1d_1$	$f_{co}=\frac{E_c\varepsilon_{mo}+f_{cr}}{k_1d_1+h_m}k_1d_1$	$k_1d_1>0$
	$f_{co}=0$	其他情况
$\Delta\varepsilon_s=\frac{\varepsilon_{mo}+\varepsilon_{cr}}{k_1d_1+h_m}(k_1d_1+h_c\lambda_s)$	$\Delta f_s=n\frac{E_c\varepsilon_{mo}+f_{cr}}{k_1d_1+h_m}(k_1d_1+h_c\lambda_s)$	
	$f_{ms}=0.85f'_m$	$h_m-h_c\lambda_s<\beta_m\chi h_m$
	$f_{ms}=0$	其他情况
$\varepsilon_{mo}=0.003$	$f_{mo}=0.85f'_m$	$k_1d_1>-h_m$
	$f_{mo}=0$	其他情况

表 E.0.6-4 中，$\beta_m\chi h_m$ 为惠特尼（Whitney）应力区的高度，应按式（E.0.6-49）～式（E.0.6-51）计算：

$$\chi h_m=\frac{\varepsilon_{mo}(k_1d_1+h_m)}{\varepsilon_{mo}+\varepsilon_{cr}} \tag{E.0.6-49}$$

$$\beta_m=0.85-0.05\left(\frac{145f'_m}{1000}-4\right) \tag{E.0.6-50}$$

$$f'_m=37.92\text{MPa} \tag{E.0.6-51}$$

式中　β_m——保护层惠特尼区（Whitney block）的宽度与受压区的宽度之比。

计算后得到对应的应力应变值后，应按式（E.0.6-52）验算轴力和弯矩的平衡等式是否能得到满足。

$\sum F=0$，即：

$$N_0-N_1=F_{ci}+F_y+F_{co}+F_s+F_m \tag{E.0.6-52}$$

$$F_{ci}=0 \qquad \text{(E.0.6-53)}$$

$$F_y=-A_y(\Delta f_y-f_{cy}) \qquad \text{(E.0.6-54)}$$

$$F_{co}=\frac{1}{2}bk_1d_1f_{co} \qquad \text{(E.0.6-55)}$$

$$F_s=A_s(\Delta f_s-f_{ms}) \qquad \text{(E.0.6-56)}$$

$$F_m=b\beta_m\chi h_m f_{mo} \qquad \text{(E.0.6-57)}$$

钢筒中心$\sum M=0$，即：

$$M_1+N_0(e_0-d_y)-N_1(e-d_y)=M_{co}+M_s+M_m \qquad \text{(E.0.6-58)}$$

$$M_{co}=F_{co}d_1\left(1-\frac{k_1}{3}\right) \qquad \text{(E.0.6-59)}$$

$$M_s=F_s(d_1+h_c\lambda_s) \qquad \text{(E.0.6-60)}$$

$$M_m=F_m(d_1+h_m-\frac{1}{2}\beta_m\chi h_m) \qquad \text{(E.0.6-61)}$$

对于 PCCPL，将钢筒和第一层预应力钢丝合在一起，并转化成截面面积相同的钢筒。具体分析时可采用如下转化方法：先设 A_y，$d_y=0$，然后用 n^* 取代 n，最后用钢丝直径 d_s^* 取代 d_s。

$$\begin{cases} n^*=n\left(1+\dfrac{A_y}{A_s}\dfrac{n'-1}{n}\right) & k_1\geqslant 0 \\ n^*=n\left(1+\dfrac{A_y}{A_s}\dfrac{n'}{n}\right) & k_1<0 \end{cases} \qquad \text{(E.0.6-62)}$$

$$\begin{cases} d_s^*=\dfrac{nA_sd_s-(n'-1)A_yt_y}{nA_s+(n'-1)A_y} & k_1\geqslant 0 \\ d_s^*=\dfrac{nA_sd_s-n'A_yt_y}{nA_s+n'A_y} & k_1<0 \end{cases} \qquad \text{(E.0.6-63)}$$

当管子采用多层缠丝时（$f=2$ 或 3），应采用与本条第 1 款相同的处理方法。

外层预应力钢丝中心弯矩 M_s 应按式（E.0.6-64）计算并取代式（E.0.6-58）右边的 M_s：

$$M_s=\sum_{j=1}^{f-1}F_{sj}(d_1+h_c\lambda_{sj}) \qquad \text{(E.0.6-64)}$$

附录 F　管道镇墩（支墩）和限制接头推力标准值计算

F.0.1　管道镇墩（支墩）承受的内水推力标准值应按下列规定计算：

1　水平向管道镇墩（支墩）承受的内水推力标准值计算分为下列几种类型进行：

1）水平弯头处镇墩（支墩）承受的内水推力标准值应按式（F.0.1-1）计算，受力见图 F.0.1-1：

$$F_{wp,k}=2PA\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \qquad (F.0.1-1)$$

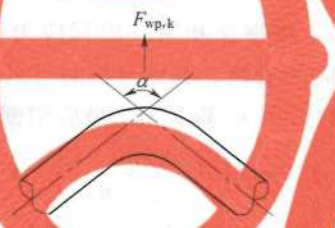


图 F.0.1-1　水平弯头处镇墩（支墩）受力示意图

2）三通及接头处镇墩（支墩）承受的内水推力标准值应按式（F.0.1-2）计算，受力见图 F.0.1-2：

$$F_{wp,k}=PA \qquad (F.0.1-2)$$

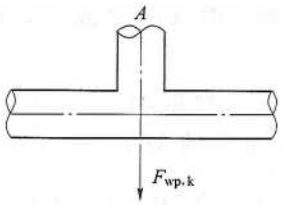


图 F.0.1-2　三通及接头处镇墩（支墩）受力示意图

3）卜形岔管处镇墩（支墩）承受的内水推力标准值应按式（F.0.1-3）计算，受力见图F.0.1-3：

$$F_{wp,k}=PA\sin\alpha \qquad (F.0.1-3)$$

式中 A——管道承口内截面面积，m^2；

α——水平弯头的度数，(°)。

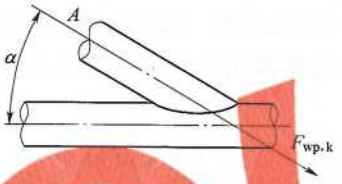


图 F.0.1-3 卜形岔管处镇墩（支墩）受力示意图

4）Y形岔管处镇墩（支墩）承受的内水推力标准应按式（F.0.1-4）计算，受力见图F.0.1-4：

$$F_{wp,k}=P\left[2A_2\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)-A_1\right] \qquad (F.0.1-4)$$

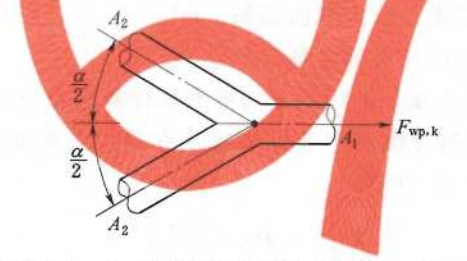


图 F.0.1-4 Y形岔管处镇墩（支墩）受力示意图

5）渐缩管处镇墩（支墩）承受的内水推力标准应按式（F.0.1-5）计算，受力见图F.0.1-5：

$$F_{wp,k}=P(A_1-A_2) \qquad (F.0.1-5)$$

式中 P——管道的设计内水压力标准值 $P=P_w+\Delta H_r$，kN/m^2；

A_1——主管承口内截面面积，m^2；

A_2——支管承口内截面面积，m^2。

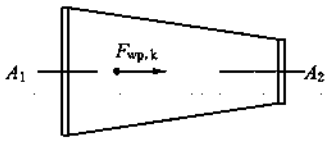


图 F.0.1-5 渐缩管处镇墩（支墩）受力示意图

2 纵向管道弯头处镇墩（支墩）承受的内水压力产生的水平力标准值及垂直力标准值应按式（F.0.1-6）～式（F.0.1-8）计算：

$$F_{wp,k}=H \tag{F.0.1-6}$$

$$H=PA(1-\cos\alpha) \tag{F.0.1-7}$$

$$V=PA\sin\alpha \tag{F.0.1-8}$$

式中 H——镇墩（支墩）承受的由内水压力引起的水平力标准值，kN；

V——镇墩（支墩）承受的由内水压力引起的垂直力标准值，kN；

A——管道承口内截面面积，m^2；

α——竖向弯头的度数，(°)。

F.0.2 限制接头承受的内水推力标准值计算应符合下列规定：

1 水平弯管及纵向弯管每侧弯管方向的内水推力标准值应按式（F.0.2-1）计算：

$$F_{wp,k}=PA\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \tag{F.0.2-1}$$

2 堵头处的内水推力标准值应按式（F.0.2-2）计算，受力见图 F.0.2：

$$F_{wp,k}=PA \tag{F.0.2-2}$$

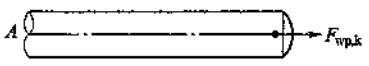


图 F.0.2 堵头处限制接头受力示意图

F.0.3 限制接头抗推力标准值计算应符合下列规定，受力见

图 F.0.3：

1 水平弯管及堵头一侧管道自重抗推力标准值应按式（F.0.3-1）计算：

$$F_k = L(2F_{sk} + G_{1k} + G_{wk})f \qquad (F.0.3-1)$$

式中 f——管道与土壤间的摩擦系数，应根据土质、基础型式试验确定。

2 纵向弯管一侧管道自重抗推力标准值应按式（F.0.3-2）计算：

$$F_k = L(F_{sk} + G_{1k} + G_{wk})\cos\left(\theta - \frac{\alpha}{2}\right) \qquad (F.0.3-2)$$

式中 F_{sk}——管顶以上覆土荷载标准值，kN/m；

G_{1k}——管体自重荷载标准值，kN/m；

G_{wk}——管中水重荷载标准值，kN/m；

L——弯管每一侧限制管道的长度，m；

θ——管道与水平面的夹角，(°)。

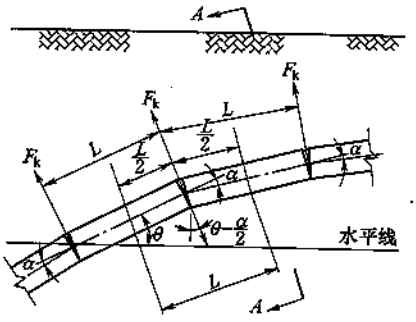


图 F.0.3 纵向弯管受力示意图

附录 G　拉开法测定涂层附着力

G.0.1　拉开法测定涂层附着力是采用拉拔的方法将涂层与基体直接拉脱，测定其附着力。

G.0.2　测试应采用拉脱式涂层附着力测试仪。

G.0.3　测试应在涂层涂装完毕经 7d 后进行。

G.0.4　按每 $50m^2$ 面积随机找 3 个测点进行检测，用零号细砂纸将每一点的涂层面轻轻打磨粗糙，并用丙酮或酒精等溶剂除油。同时，也对黏聚力测试仪的铝合金铆钉型圆盘底座面作同样打磨、除油处理。最后用粘结剂把经打磨过的圆盘座粘结到处理好的涂层上。

G.0.5　待粘结剂硬化 24h，用拉脱式涂层黏聚力测试仪的配件套筒式割刀，将圆盘座的周边涂层切除，使其与周边外围的涂层分离开。

G.0.6　将附着力仪配件的钢环支座片套住圆盘座，然后把附着力仪的手轮作反时针旋转，使仪器的爪具松下并嵌入铝合金铆钉头型圆盘座，令仪器的 3 只支撑柱立在钢环支座片上，将仪器的指针拨到“0”的刻度位置。顺时针方向旋紧手轮，一直持续到涂层断裂为止，并立即记录指针的读数及破坏部位。按本步骤重复试验，将每一铝合金铆钉头型圆盘座拔下来，记录每一次拉拔的读数和破坏部位。

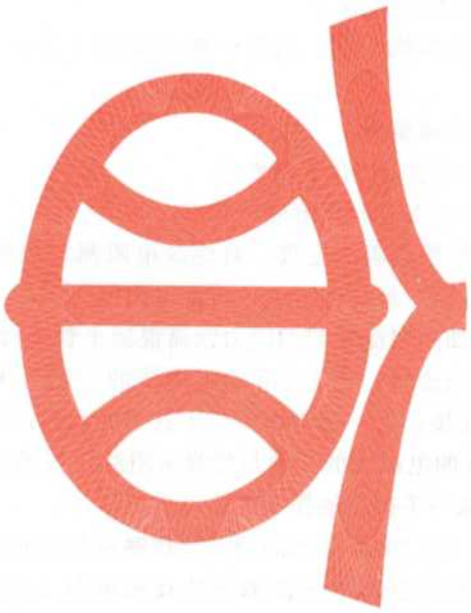
G.0.7　试验结果应按下列方法评定：

1　试验后立即观察铝合金仰钉头型圆盘座的底面粘结物的情况，如果底面有 75%以上的面积粘附着涂层或混凝土等物体，则试验数据有效，该测点为有效测点。

2　如果底面只有 75%以下的面积粘有涂层或混凝土等物

体，且拉力小于 1.5MPa，则可在该测点的附近涂层面上重做试验。

G.0.8 涂层与砂浆的附着力应以有效测点附着力的平均值表示。



附录 H　涂层电阻测定方法

H. 0. 1　可通过测定未加防腐涂层和加防腐涂层混凝土试样的电阻来判定管道外防腐涂层的抵抗腐蚀介质的能力。

H. 0. 2　测试设备应包括下列设备：

1　绝缘电阻测定仪。

2　连接电缆线 2 根，其中一根长度为 1.5m，另一根长度为 6.5m。

3　手持接触探头。

H. 0. 3　测试程序应符合下列要求：

1　配置 0.5M NaCl 溶液 500mL。

2　开启绝缘电阻测定仪，对绝缘电阻测定仪的参数进行预设置：测定电压、最高电阻值、最低电阻值。

3　对未加防腐涂层的预应力钢筒混凝土管绝缘电阻测定。

4　电缆线连接：将 1.5m 的电缆线的一端与绝缘电阻测定仪的测定端连接，另一端用鳄鱼夹于管道的承插口的钢圈牢固连接；将 6.5m 的电缆线的一端与绝缘电阻测定仪的另一个测定端连接，另一端与手持接触探头的连接导线连接。

5　用 0.5M NaCl 盐水湿润手持接触探头的海绵块。

6　将手持接触探头的湿海绵块接触混凝土管外表面一点，读出相应的电阻值。

7　在同一管道的不同位置重复“6”步骤进行测试，对完成的一组测试数据计算平均电阻，最高电阻和最低电阻。

8　对加防腐涂层的管道的绝缘电阻测定。

9　重复 4～7 款步骤，测定加防腐涂层的管道的绝缘电阻率。

附录Ⅰ 阴极保护设计计算

Ⅰ.0.1 阴极保护设计计算的主要内容为牺牲阳极的计算。

Ⅰ.0.2 单支立式牺牲阳极接地电阻应按式（Ⅰ.0.2-1）和式（Ⅰ.0.2-2）计算：

$$R_v=\frac{\rho}{2\pi l_g}\left(\ln\frac{2l_g}{D_g}+\frac{1}{2}\ln\frac{4t_g+l_g}{4t_g-l_g}+\frac{\rho_g}{\rho}\ln\frac{D_g}{d_g}\right)\quad(l_g\gg d_g,\ t_g\gg l_g/4)\tag{Ⅰ.0.2-1}$$

$$d_g=\frac{C}{\pi}\tag{Ⅰ.0.2-2}$$

式中 R_v——立式牺牲阳极接地电阻，Ω；

ρ——土壤电阻率，Ω·m；

l_g——裸牺牲阳极长度，m；

D_g——预包装牺牲阳极直径，m；

t_g——牺牲阳极中心至地面的距离，m；

ρ_g——填包料电阻率，Ω·m；

d_g——裸牺牲阳极等效直径，m；

C——周长，m。

Ⅰ.0.3 单支水平式牺牲阳极接地电阻应按式（Ⅰ.0.3）计算：

$$R_h=\frac{\rho}{2\pi l_g}\left\{\ln\frac{2l_g}{D_g}\left[1+\frac{l_g/4t_g}{\ln^2(l_g/D_g)}\right]+\frac{\rho_g}{\rho}\ln\frac{D_g}{d_g}\right\}\quad(l_g\gg d_g,\ t_g\gg l_g/4)\tag{Ⅰ.0.3}$$

式中 R_h——水平式牺牲阳极接地电阻，Ω。

Ⅰ.0.4 多支牺牲阳极接地电阻应按式（Ⅰ.0.4）计算：

$$R_g=k\frac{R_0}{n}\tag{Ⅰ.0.4}$$

式中 R_g——多支组合牺牲阳极接地电阻，Ω；

k——牺牲阳极接地电阻修正系数，可查图Ⅰ.0.4；

R_0——单支牺牲阳极接地电阻，Ω；

n ——阳极支数。

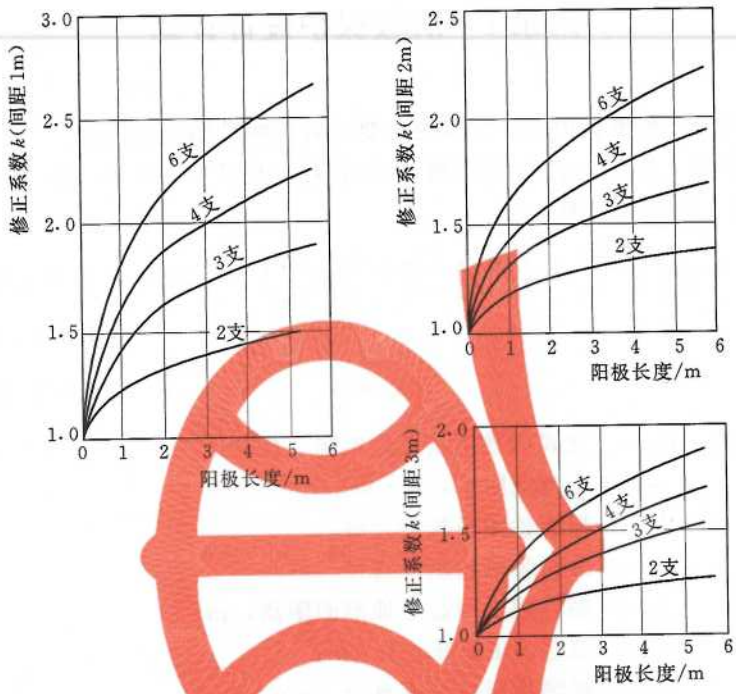


图 I.0.4　阳极接地电阻修正系数 k

I.0.5　牺牲阳极输出电流应按式（I.0.5）计算：

$$I_g = \frac{(E_c - \Delta E_c) - (E_a + \Delta E_a)}{R_g + R_c + R_l} = \frac{\Delta E}{R} \qquad (I.0.5)$$

式中　I_g——牺牲阳极输出电流，A；

R——回路总电阻，Ω；

E_c——阴极开路电位，V；

ΔE_c——阴极电位极化值，V；

E_a——阳极开路电位，V；

ΔE_a——阳极电位极化值，V；

R_g——多支组合牺牲阳极接地电阻，Ω；

R_c——阴极过渡电阻，Ω；

R_l——导线电阻，Ω；

ΔE——阴阳极之间有效电位差，V。

I.0.6 所需牺牲阳极支数应按式（I.0.6）计算：

$$n=\frac{BI}{I_g} \tag{I.0.6}$$

式中 n——牺牲阳极支数；

B——备用系数，取2～3；

I——保护电流，A；

I_g——单支牺牲阳极输出电流，A。

I.0.7 牺牲阳极工作寿命应按式（I.0.7）计算：

$$T_g=0.85\frac{W_g}{\omega_g I} \tag{I.0.7}$$

式中 T_g——牺牲阳极工作寿命，年；

W_g——牺牲阳极组净质量，kg；

ω_g——牺牲阳极消耗率，kg/(A·a)；

I——保护电流，A。

标准用词说明

标准用词	严格程度
必须	很严格，非这样做不可
严禁	
应	严格，在正常情况下均应这样做
不应，不得	
宜	允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做
不宜	
可	有选择，在一定条件下可以这样做

中华人民共和国水利行业标准

预应力钢筒混凝土管道技术规范

SL 702—2015

条 文 说 明

目　　次

1　总则 …… 113
2　术语和符号 …… 117
3　材料 …… 118
4　管线选择与布置 …… 121
5　水力计算 …… 124
6　管道结构计算 …… 134
7　构造规定 …… 145
8　防腐涂层 …… 147
9　阴极保护 …… 149
10　施工安装 …… 153
11　管道功能性试验 …… 157
12　安全监测 …… 158
13　工程验收 …… 159
附录A　管顶垂直土压力计算 …… 160
附录B　地面车辆荷载计算 …… 161
附录C　弯矩和轴力修正系数表 …… 162
附录D　徐变和收缩参数 …… 163
附录E　极限状态计算方法 …… 165
附录F　管道镇墩（支墩）和限制接头推力标准值计算 …… 205

1 总　　则

1.0.1 预应力钢筒混凝土管（Prestressed Concrete Cylinder Pipe，简称 PCCP）是在带钢筒的混凝土管芯上缠绕一层或数层环向预应力钢丝，并辊射水泥砂浆保护层而制成的管子。它的开发应用已有 50 多年的历史。这一技术是法国 Bonna 公司最先研制的，美国、加拿大是世界上推广使用预应力钢筒混凝土管最多的国家，广泛应用于水利工程、城市输配水干管、火电站供水管、雨污水干管、工业供水及废水管线等方面。美国从 1942 年开始研究生产预应力钢筒混凝土管，至今从管子设计、制造、检测到运输、安装、使用等方面均已实现了规范化。预应力钢筒混凝土管的优点可概括如下：

（1）高强度。承受内水压力可达 2～3MPa，最高可达 5MPa，由于预应力钢丝可多层重叠，故可适应埋置地下较大深度。国内应用其输水工作压力已达 2.0MPa，覆土已达 12m。

（2）高抗渗性。最优化地利用钢材和混凝土，薄钢板起到高抗渗的作用。

（3）高密封性。采用钢制承插口接头，插口端的工作面是定型钢环，几何尺寸误差小，承插工作面间隙仅 1～2mm，采用 O 形实心胶圈，密封性能良好，承插口可设计成双胶圈，便于在施工期检验接口的密封性。

（4）耐久性好。可适应腐蚀性土壤的恶劣环境，在一般性土壤中敷设，由于管芯混凝土、保护层砂浆使钢筒和预应力钢丝四周受高碱性环境保护，钢材处于钝化状态，可以减缓腐蚀。若埋设在腐蚀性强的土壤中，通过采取管外壁防腐涂层和阴极保护措施可进行更好的保护。

（5）因可使用限制接口，管道转弯时可免去支墩，安装方便，加快了施工进度。

（6）管道维护费用低。据美国压力管协会统计，在钢管、混凝土管、球墨铸铁管中，以 PCCP 管的维护费用最低。

（7）此外，PCCP 管还可以带压打孔，安装支线。

PCCP 管也存在一些问题，如在腐蚀环境中发生突然爆管，管节较短，接头多，转角小，适应地基变形能力弱，自重大，安装调运需大型设备，内表面混凝土长期运行糙率会增大等。鉴于 PCCP 管具有高强度、高抗渗性、高密封性、接口尺寸精确、管道维护费用低等优点，其管材性能优良，具有发展前途。近 10 余年国内建成了一批预应力钢筒混凝土管道工程（见表 1），积累了较丰富的设计、施工及运行经验。“十一五”国家科技支撑计划研究课题“超大口径 PCCP 管道结构安全与质量控制研究”按照设计方法标准与国际接轨，制造及施工技术达到国际先进水平的总要求，进行了有关室内原材料及混凝土与砂浆试验、结构计算方法研究与程序开发、管道水力研究、大型管道现场试验、管道运输安装研究、管道耐久性及结构安全研究等。以上成果是本标准制定的重要技术支持。为便于指导预应力钢筒混凝土管设计、生产、敷设、监理及工程验收，特制定预应力钢筒混凝土管技术标准。

表 1　预应力钢筒混凝土管（PCCP）工程应用实例表

序号	工 程 名 称	直径 /m	工作压力 /MPa	管长 /km	建设年份
1	深圳西部发电站海水循环管道	2.4	0.3	0.22	1996
2	深圳中一西部管道输水工程	2.2	0.8	22.7	1997
3	深圳东部管道输水工程	2.6	0.6	7.8	1997
4	深圳输水管道	3.0	0.6	9.5	1998
5	黑龙江七台河电厂循环水工程	2.4	0.6	0.72	1998

表 1（续）

序号	工 程 名 称	直径 /m	工作压力 /MPa	管长 /km	建设年份
6	莱城电厂补充水、循环水工程	2.4	1.0	0.185	
7	日照电厂循环水管工程	2.4	0.4	1.0	1997
8	上海河流污水处理工程二期	3.6	0.6	3.91	
9	呼和浩特引黄工程	2.0	1.0	63	
10	长春市引松入长工程	2.0	1.0、0.8	12.0	1998—2000
11	山西万家寨引黄工程连接段	3.0	0.6～1.0	43.6	2002
12	哈尔滨磨盘山输水工程	2.2	1.0	2×135	2003—2009
13	和田皮墨垦区引水灌溉工程	1.2～2.4	1.0	35	2004
14	北疆供水工程三个泉倒虹吸工程	2.8	0.4～1.4	2×7.385	2005
15	广州西江引水工程	3.6		2×46.5	2009
16	山西万家寨引黄二期北干线工程	2.2～3.0		117.4	2010
17	辽宁大伙房水库输水（二期）工程	2.4、3.2	0.6～1.0	265	2009
18	辽宁大伙房水库输水（三期）工程	2.4、2.8		150.96	2010
19	南水北调京石段供水工程北京段	4.0	0.6～0.8	2×56.4	2006—2008
20	利比亚大人工河工程一期	1.6、2.0、2.8、4.0	0.6～1.8	1872	1984—1991
21	利比亚大人工河工程二期	4.0	2.0、2.6	1731	1991—1996

1.0.2 根据预应力钢筒混凝土管道两种类型管道（PCCPL 和 PCCPE）的生产工艺特点、在我国的应用情况和 GB/T 19685《预应力钢筒混凝土管》，特作出此规定。本标准提供的设计方法也适用于内径大于 4000mm 的管道。GB/T 19685 适用的管道制造公称内径为 400～4000mm 与美国《AWWA Standard for Prestressed - Concrete Pressure Pipe, Steel - Cylinder Type》（ANSI/AWWA C301）标准适用的管道直径［范围为：16 in.（410mm）～ 144 in.（3660mm）］基本一致。当采用内径 4000mm 以上管道时，应综合考虑管道使用工况、现场环境条件、制造、运输、安装等因素，进行必要的技术经济比较。

1.0.4 参考的国外同类标准有：

《AWWA Standard for Prestressed - Concrete Pressure Pipe, Steel - Cylinder Type》（ANSI/AWWA C301）

《AWWA Standard for Design of Prestressed - Concrete Cylinder Pipe》（ANSI/AWWA C304）

《Concrete Pressure Pipe》（AWWA MANUAL M9）

《Steel Pressure Pipe》（AWWA MANUAL M11）

2 术语和符号

2.1 术　语

本节列出的术语内容，主要是根据 GBJ 132《工程结构设计基础术语和通用符号》、GB/T 50083《建筑结构术语和符号标准》和 CECS 83《管道工程常用术语》等给出的。

2.2 主要符号

本节列出的主要符号，系根据下列原则确定：

（1）在 GB 50332《给水排水工程管道结构设计规范》中采用的符号，本标准一律采用，以方便工程设计应用。

（2）本标准需要的专门符号，在 ANSI/AWWA C304 和 AWWA M9 中已列出的按 GB 50010 规定的原则，重新做了一些调整。

3 材　　料

3.1 管芯混凝土

3.1.1 本条规定与GB 50010《混凝土结构设计规范》和SL 191《水工混凝土结构设计规范》是一致的。

3.1.2 混凝土强度等级应不低于C40。对预应力混凝土结构，SL 191《水工混凝土结构设计规范》和GB 50010《混凝土结构设计规范》都要求混凝土的强度等级不应低于C40。混凝土的配合比设计、成型、养护和试验按SL 352《水工混凝土试验规程》的相关规定执行。

3.1.3 混凝土抗压强度设计值 f'_c 为 $0.8f_{cu,k}$。本标准中的管道结构设计方法等效采用了美国标准ANSI/AWWA C304，其设计准则采用极限状态设计，其中工作极限准则和强度极限准则规定的混凝土强度设计值采用极限荷载下的强度值，因此本标准采用与美国规范相同取值原则，即混凝土的抗压强度设计值为极限荷载下的轴心抗压强度，与我国标准中相对应的是混凝土的强度等级，这与我国标准明显不同。同时我国混凝土结构设计标准和混凝土试验方法标准都规定：混凝土强度等级采用边长为150mm立方体试件测的具有95%保证率的值，而美国ASTM标准则采用 ϕ150mm的圆柱体试件作为强度等级标准试件，由于混凝土试件形状和尺寸影响，立方体和圆柱体两者之间存在换算关系，系数0.8为采用圆柱体试件测定的抗压强度值与立方体试件测得的抗压强度的换算系数。根据大量试验结果统计，圆柱体与立方体测得的抗压强度的比值随混凝土强度等级的不同而变化，一般随混凝土强度等级的提高，比值呈增大趋势，对强度等级超过C50的混凝土，两者之间的换算系数大于0.80，本标准推荐混凝土圆柱体试件与立方体试件抗压强度的换算系数取0.8偏于保守，这一取值与国家标准、国内其他行业标准推荐值，以

及美国标准推荐值是相同的。

3.1.4 管芯混凝土的抗拉强度设计值和弹性模量设计值参照美国标准 ANSI/AWWA C304 推荐的公式计算得出，并对立方体试件测得的抗压强度进行了换算。目前国内大多数预应力钢筒混凝土管道工程都采用美国标准对管道结构进行设计，考虑到美国标准在实际工程中验证的可靠性和技术成熟性，本标准推荐管芯混凝土抗拉强度和弹性模量采用与美国标准一致的取值。

3.2 保护层砂浆

3.2.1～3.2.3 保护层砂浆不同于普通建筑砂浆，其作用是保护预应力钢丝免受外界环境的腐蚀和破坏，保证管道的耐久性和使用寿命，因此对砂浆的密实性和抗渗性要求较高。美国标准 ANSI/AWWA C304 要求保护层砂浆的最低抗压强度设计值为 37.9MPa，换算为我国标准立方体试件，并考虑砂浆试件尺寸效应后取 45MPa 作为砂浆保护层的标准值。砂浆抗压强度的设计值取值方法与混凝土设计值相同。

3.2.4 砂浆抗拉强度设计值和弹性模量设计值的计算方法参考美国标准 ANSI/AWWA C304 取值。

3.3 钢　　筒

3.3.1 规定了制作钢筒用薄钢板的最小厚度要求。

3.3.2、3.3.3 规定了钢筒所用薄钢板的类型、质量和技术要求。“钢板的最小屈服强度不应低于 215MPa”，采用的是我国钢材相关标准的规定值。通过比对我国钢材牌号与美国钢材牌号，美国标准推荐的钢材最小屈服强度 227MPa 与我国标准对应的是 Q215 级。

3.4 预应力钢丝

3.4.1 规定了预应力钢丝的类型和相应的性能要求。

3.4.2、3.4.3 国内 PCCP 工程预应力钢丝的张拉控制应力值一

般取 $0.70f_{su}$ 或 $0.75f_{su}$，两个取值在工程中都有采用，美国标准推荐取值为 $0.75f_{su}$。因预应力钢丝没有明显的屈服点，一般采用极限强度标志，与钢筒和配件用屈服强度标志钢板牌号是不一样的。预应力钢丝一般取一定残余应变所对应的应力作为其条件屈服强度，GB/T 5223 规定冷拉钢丝的条件屈服强度不小于公称抗拉强度的 75%，消除应力的光圆及螺旋肋钢丝不小于公称抗拉强度的 88%，对普通松弛钢丝应不小于公称抗拉强度的 85%。美国 ANSI/AWWA C304 建议钢丝的屈服强度 f_{sy} 取值为 $0.85f_{su}$。规定预应力钢丝的最大抗拉强度不宜大于 1670MPa，以及各规格预应力钢丝的最低扭转圈数是防止钢丝发生脆性断裂。

3.4.4 在服役过程中，预应力钢丝因应力腐蚀而导致断裂无法预防，因此修订 GB/T 5223—2002《预应力混凝土用钢丝》时增加了预应力钢丝氢脆敏感性要求。

3.5 承插口和配件

3.5.1、3.5.2 本节参照 GB 19685 的规定。

3.6 其 他

3.6.1 目前我国预应力钢筒混凝土管接头橡胶圈多采用聚异戊二烯合成橡胶，采用除聚异戊二烯外的其他合成橡胶经检验合格后也可采用。规定了橡胶圈的基本性能、技术要求和检验方法。

3.6.2 本条参考 GB/T 21448《埋地钢质管道阴极保护技术规范》制定。

4 管线选择与布置

4.0.1 管道线路由选择考虑的因素：

（1）水利工程输水管路由需满足流域规划和水利枢纽总体布局的要求，为城市供水的管道路由要服从当地城市规划，满足规划部门管线综合布置要求。

（2）选线时除尽量避开活动断层、滑坡、地下水位高和涌水量很大等不良地段外，还要避开盐渍、膨胀土、湿陷性黄土、淤泥质土、岩溶等不良地质构造地段，当不能避开时，根据当地地质、环境条件，采取适当的地基加固处理措施，提高地基的承载力，减少其变形量，当管线经过地区的地质情况复杂，要进行地质灾害评价。

（3）城镇地区敷设管道时，拆迁补偿费用的投资比重较大，选线时尽量选择拆迁量少的地段。

（4）输水管的长度对投资的影响很大。缩短管线的长度可以有效节省工程造价，减少水头损失。

（5）管线选线时，还要遵守国家关于环境保护、水土保持和文物保护等方面的有关规定。

4.0.2 根据 GB 50013《室外给水设计规范》规定输水干管条数。输水工程的安全供水非常重要。当输水干管距离较长，建两条管道投资较大，且在供水区域，输水干管断流维修期间，有满足事故供水量的调节水库（池）及其他安全供水措施的情况下，输水干管可修建一条。为减少管道在事故和维护检修期间对相邻管道的影响，在有条件的地区，多条管道一般分槽敷设。当多条管道同槽敷设时，管道间距根据安装、回填施工工艺及采用的机器具的要求合理确定。

4.0.3 当受现有管线、建（构）筑物位置以及道路宽度等因素影响，所建管道与其相交或相邻的建（构）筑物的最小净距不能

满足时，可根据实际情况，采取安全措施，减小间距。

4.0.4 在满足输水能力要求的前提下，进行技术经济比较后，选择较大的管径和较小的工作压力。采用重力流输水的管道，其进出口落差为定值。泵站提水压力管道的直径应根据技术经济比较确定。对于长管线通常采用不同的管径。初拟管径时可根据经济流速确定。经验表明，管道的经济流速通常为0.9～1.8m/s，由此混凝土压力管道的经济管径可按式（1）初步确定：

$$D=2\sqrt{\frac{Q}{\pi v}} \tag{1}$$

式中 D——混凝土压力管内径，m；

Q——设计流量，m^3/s；

v——经济流速，m/s，一般为0.9～1.8m/s。

当为城镇水厂输送原水时，输水干管任意一段发生故障时，仍能输送设计水量70%的事故水量。

4.0.5 如果在正常运行中压力管道内出现负压，一般会出现振动、空蚀、掺气和脉动压力等作用，对管道的过流能力、结构的受力状态都会产生不利影响。有压流留有2.0m水柱的压力余幅是几十年来我国有压隧洞设计一直沿用的标准。

4.0.6 管道中设置调压井、安全阀可起到消减水锤作用。长距离输水管中经常出现水气相间甚至气团阻水的现象，影响输水能力，增加耗能和危害管道安全。管道中设置通气设施可在管道充水时排气泄（排）水时向管内注气，防止管内出现真空，在运行时及时排除和补充管内气体，使输水管道安全运行。

4.0.7 输水管的通气设施是管道安全运行的重要措施。通气设施一般采用空气阀，有条件的地方也可采用通气孔，其位置、数量、形式、口径可根据纵断布置、水锤计算等确定，一般在管道的隆起点上必须设置通气设施。在管道的平直段一般间隔一段距离设置一处，当管径较大时，间距宜小，管径较小时，距离可稍大。GB 50013规定的间隔为1000m，南水北调中线PCCP工程采用的间距为500～800m。

4.0.9 合并成空间转弯的水头损失较小，弯管配件数量少。采用小转角借转可以不用或减小止推墩，使用时，要确保管道的弯曲半径满足锁定要求的几何条件。分析研究推力和土壤地质条件，确保弯道处管道抗滑稳定。

4.0.10 输水管的始点、分叉处、分水口、终点一般设置阀门；管道穿越大江大河、高铁、高速公路等应根据相关部门的规定结合具体情况设置阀门；输水管还要根据自身检修和事故抢修的需要设置阀门。阀门拆卸要方便。

4.0.11 泄（排）水设施的主要作用是排泥、管道检修排水以及抢险排水。

4.0.12 设置进人孔和管道检修设备进出口，可以方便进入管道内部进行检查、维护和加固等。进人孔通常与空气阀结合布置，孔径为 600～800mm。较大直径管道在进行内部检查、维护、检修时需要大型设备，故应设置专门的设备进出口，可结合事故检修段设置。

4.0.13、4.0.14 输水管道穿越其他重要设施时，要遵守穿越设施的相关规程规范。保证双方工程的安全运行和管理维护要求。

表 2　已建工程 PCCP 管道的粗糙系数取值

工程名称	管径/mm	粗糙系数 n 设计值
北京怀柔应急供水工程	*DN*1800	0.0125
北京张坊应急供水工程	*DN*2000	0.0125
呼和浩特引黄工程	*DN*2000	0.0125
哈尔滨磨盘山输水工程	*DN*2200	0.0115
辽宁大伙房水库输水（一期）工程	*DN*2400～*DN*3200	0.0115
深圳市供水网络工程	*DN*3000	0.0110
山西万家寨引黄工程	*DN*3000	0.012～0.0125
利比亚大人工河工程	*DN*4000	0.0116
南水北调京石段供水工程北京段	*DN*4000	0.0125

5.0.5　管道局部水头损失系数 ξ 可按表 3～表 5 选用。

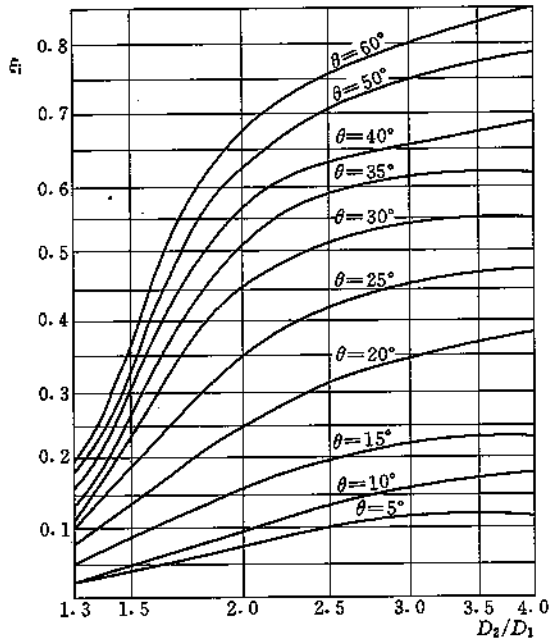


图 1　逐渐扩大的损失系数 ξ_1 值（$\theta<60°$）

表 3　局部水头损失系数 ξ_s 值表

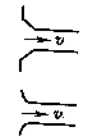
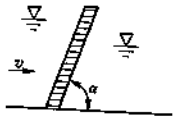
序号	部位	形　状	水头损失系数 ξ	备　注
1	进水口		0.5	v—管道均匀段之流速
			0.2	
			0.1	
2	拦污栅		$\beta\left(\frac{s}{b}\right)^{\frac{4}{3}}\sin\alpha$	β—栅条形状系数，见表 4 s—栅条宽度 b—栅条间距 α—栅条倾角 v—过栅平均流速

表 3（续）

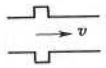
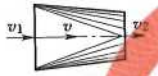
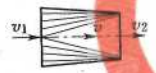
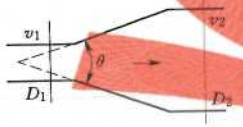
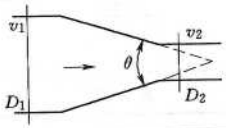
序号	部位	形　状	水头损失系数 ξ	备　注
3	门槽		0.05～0.20 （一般用 0.10）	v 取槽前后平均流速
4	矩形变圆 （渐缩）		0.05	v 取渐变段平均流速，$\frac{v_1+v_2}{2}$
5	圆变矩形 （渐缩）		0.10	流速取 $\frac{v_1+v_2}{2}$
6	圆断面渐 扩大		ξ_1 查图 1	流速取 v_1
7	圆断面 渐缩小		ξ_d 查图 2	流速取 v_1

表 3（续）

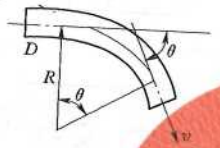
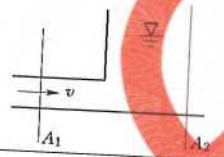
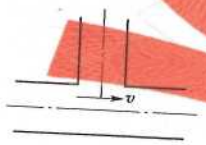
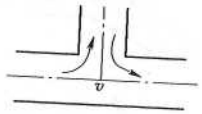
序号	部位	形　状	水头损失系数 ξ	备　注
8	圆弧弯道		$\left[0.131+0.1632\times\left(\frac{D}{R}\right)^{\frac{7}{2}}\right]\times\left(\frac{\theta}{90^\circ}\right)$	D—洞径 R—弯道半径 θ—弯道转角
9	出水口		$\left(1-\frac{A_1}{A_2}\right)^2$ （流入水池或水库时取 1）	A_1、A_2—出口前后断面积 v 取出口前流速
10	直角分岔		0.10	
			1.50	

表 3（续）

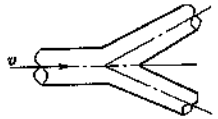
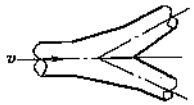
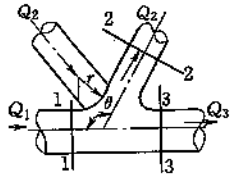
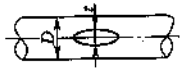
序号	部位	形　状	水头损失系数 ζ	备　注
11	对称 Y 形分岔		0.75	无圆锥管段
			0.50	有圆锥管段
12	T（卜）形分岔		分流见式（4）～式（7）	
			合流见式（8）～式（11）	
13	蝶阀		见表 5	

表 4　栅条形状系数 β 数值表

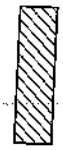
栅条形状							
β	2.42	1.83	1.67	1.035	0.92	0.76	1.79

表 5　蝶阀完全开启时，ξ 与 t/D 比值的关系表

t/D	0.10	0.15	0.20	0.25
ξ	0.05～0.10	0.10～0.16	0.17～0.24	0.25～0.35

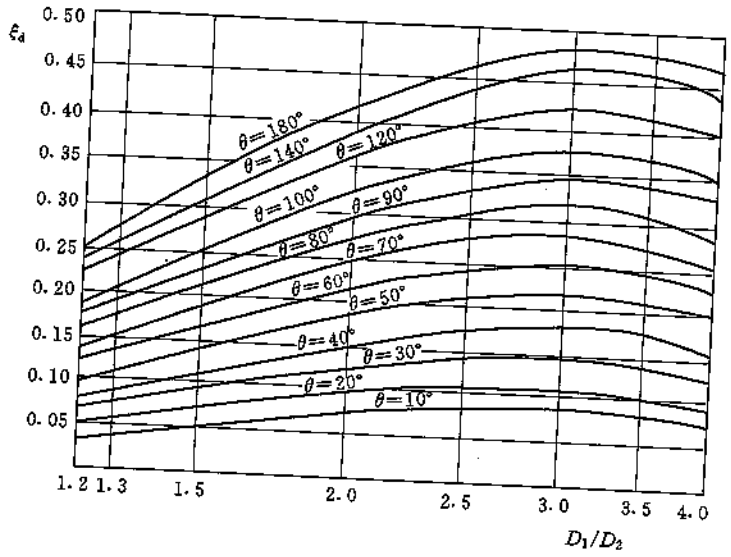


图 2　逐渐缩小的损失系数 ξ_d 值

在完全开启时，若缺乏有关资料，可近似取 $\xi=0.2$。

T（卜）形岔管的分流与合流的局部损失计算（见图 3）。

(1) 分流时（$Q_1=Q_2+Q_3$）：

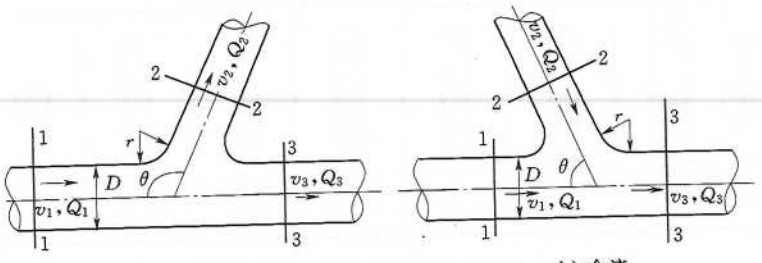


图 3　T（卜）形岔管分流与合流局部损失计算形状示意图

$$\left.\begin{aligned} H_2 - H_1 &= \xi_2 \frac{v_1^2}{2g} \\ H_3 - H_1 &= \xi_3 \frac{v_1^2}{2g} \\ H_3 - H_2 &= \xi_{32} \frac{v_1^2}{2g} \end{aligned}\right\} \tag{4}$$

$$\xi_2 = -0.95(1-q_2)^2 - q_2^2\left(1.3\operatorname{ctg}\frac{\theta}{2} - 0.3 + \frac{0.4-0.1\psi}{\psi^2}\right) \times \left(1 - 0.9\sqrt{\frac{\rho}{\psi}}\right) - 0.4\left(1+\frac{1}{\psi}\right)\operatorname{ctg}\frac{\theta}{2}(1-q_2)q_2 \tag{5}$$

$$\xi_3 = -0.58q_2^2 + 0.26q_2 - 0.03 \tag{6}$$

$$\xi_{32} = (1-q_2)\left\{0.92 + q_2\left[0.4\left(1+\frac{1}{\psi}\right)\operatorname{ctg}\frac{\theta}{2} - 0.72\right]\right\} + q_2^2\left[\left(1.3\operatorname{ctg}\frac{\theta}{2} - 0.3 + \frac{0.4-0.1\psi}{\psi^2}\right) \times \left(1 - 0.9\sqrt{\frac{\rho}{\psi}}\right) - 0.35\right] \tag{7}$$

式中　H_1、H_2、H_3——断面 1—1、断面 2—2、断面 3—3 处的总水头，m；

v_1——断面 1—1 的平均流速，m/s；

θ——主管与支管的交角，(°)；

ψ——支管与主管的断面面积比；

ρ——$\rho = r/D$，D 为主管直径，r 为支管与主

管连接处的修圆半径，m；

q_2——$q_2=Q_2/Q_1$，Q_2 为支管流量，Q_1 为分流前的主管流量，在分流时规定 $q_2>0$。

（2）合流时（$Q_1+Q_2=Q_3$）：

$$\left.\begin{aligned} H_2-H_1&=\xi'_2\frac{v_3^2}{2g}\\ H_3-H_1&=\xi'_3\frac{v_3^2}{2g}\\ H_3-H_2&=\xi'_{32}\frac{v_3^2}{2g}\end{aligned}\right\} \tag{8}$$

$$\xi'_2=-0.95(1+q_2)^2+q_2^2\left[1+0.42\left(\frac{\cos\theta}{\psi}-1\right)-0.8\left(1-\frac{1}{\psi^2}\right)+(1-\psi)\left(\frac{\cos\theta}{\psi}-0.38\right)\right] \tag{9}$$

$$\xi'_3=q_2^2\left[2.59+(1.62-\sqrt{\rho})\left(\frac{\cos\theta}{\psi}-1\right)-0.62\psi\right]+q_2(1.94-\psi)-0.03 \tag{10}$$

$$\xi'_{32}=(1+q_2)[0.92+q_2(2.92-\psi)]+q_2^2\left[(1.2-\sqrt{\rho})\left(\frac{\cos\theta}{\psi}-1\right)+0.8\left(1-\frac{1}{\psi^2}\right)-(1-\psi)\frac{\cos\theta}{\psi}\right] \tag{11}$$

式中 q_2——支管流量 Q_2 与合流后的流量 Q_3 之比，合流时，规定取 $q_2<0$；

其余符号意义同前。

6 管道结构计算

6.1 管道结构上的荷载（作用）

6.1.1 管道结构上的作用荷载（作用）分类，按照 SL 191《水工混凝土结构设计规范》的规定进行确定。

施工荷载包括管顶地面堆土荷载和施工期临时荷载。管顶地面堆土荷载是指管道在施工过程中或完工后由管顶地面短时堆土引起的荷载；施工期临时荷载是指在施工过程中，施工设备作用在管顶的荷载。管顶地面堆土荷载与施工期临时荷载不叠加。

6.1.2 进行管道结构计算所采用的永久荷载（作用）分项系数 γ_G 及可变荷载（作用）分项系数 γ_Q 取值依据 ANSI/AWWA C304 确定；管道及附属建筑物稳定计算和地基承载力验算的永久荷载（作用）分项系数 γ_G 及可变荷载（作用）分项系数 γ_Q 取值依据 DL 5077《水工建筑物荷载设计规范》确定。附属建筑物包括建在管线上的镇墩、支墩、阀井等。

6.1.3 结构计算时的管顶垂直土压力计算参照《混凝土压力管设计手册》（AWWA M9）相关内容进行计算，并计入管顶地面堆土荷载。

6.1.4 规定了地面车辆荷载的计算方法。公路活荷载计算参照 GB 50332《给水排水工程管道结构设计规范》的规定，或由业主指定。铁路活荷载计算参照 TB 10002.1《铁路桥涵设计基本规范》的规定。

6.1.5 条文有以下几点说明：

在管道结构计算前，应对管线进行水锤计算。当没有水锤计算结果时，可采用本规定选取水锤压力，该数值来源于 ANSI/AWWA C304。

现场试验压力是在管道铺设后，用于检验管道的试验内压。其值有可能超过工作内压，持续时间比短期瞬时内压要长，但比

长期工作内压要短，一般取 1.2 倍的工作压力值。

6.1.6 分别给出了各种工况、荷载组合及荷载组合系数。工况的名称及荷载组合系数均来源于 ANSI/AWWA C304，给出的荷载组合系数是极限状态设计方法的最小荷载系数。表 6.1.6 计算公式如下：

(1) 基本荷载组合工况：

W1：$F_{sk}+G_{1k}+G_{wk}+P_w$

W2：$F_{sk}+G_{1k}+G_{wk}$

FW1：$1.25F_{sk}+G_{1k}+G_{wk}$

(2) 特殊荷载组合工况：

WT1：$F_{sk}+G_{1k}+G_{wk}+F_{wk}+\Delta H_r$

WT2：$F_{sk}+G_{1k}+G_{wk}+q+P_w$

WT3：$F_{sk}+G_{1k}+G_{wk}+q$

FWT1：$\beta_1(F_{sk}+G_{1k}+G_{wk}+P_w+\Delta H_r)$

FWT2：$\beta_1(F_{sk}+G_{1k}+G_{wk}+q+P_w)$

FWT3：$\beta_2(F_{sk}+G_{1k}+G_{wk}+P_w+\Delta H_r)$

FWT4：$\beta_2(F_{sk}+G_{1k}+G_{wk}+q+P_w)$

FWT5：$1.6(F_{sk}+G_{1k}+G_{wk})+2.0q$

FWT6：$1.6P_w+2.0\Delta H_r$

FT1：$1.1(F_{sk}+G_{1k}+G_{wk}+P_{ft})$

FT2：$1.1\beta_1(F_{sk}+G_{1k}+G_{wk}+P_{ft})$

式中 β_1——安全系数，PCCPE 取 1.1，PCCPL 取 1.2；

β_2——安全系数，PCCPE 取 1.3，PCCPL 取 1.4。

在基本荷载组合工况 FW1 中，考虑到径向拉力可能会造成内层混凝土和钢筒脱离，以及管顶和管底的混凝土开裂，管顶垂直土压力 F_{sk} 的组合系数取 1.25，且工况 FW1 只用于 PCCPE。

弹性极限状态的安全系数 β_1 取决于制造公差，由于制造公差对于 PCCPL 的影响较大，故 PCCPL 的 β_1 取 1.2，PCCPE 的 β_1 取 1.1。强度极限状态的安全系数 β_2 是在试验基础上选取的，PCCPL 的 β_2 取 1.4，PCCPE 的 β_2 取 1.3。

持续时间长的现场试验压力与水锤压力不同，因此在现场试验条件下，即工况 FT1、FT2，工作极限状态和钢丝弹性极限状态的安全系数提高 10%，系数取值为 1.21。

6.1.8 管道结构设计的最低条件：沟埋管、覆土 1.75m（填土材料单位重量标准值为 20kN/m³）；最小工作压力 P_w = 0.276MPa；管道基础支承角：运行时 45°，空管时 15°；无水锤压力和车辆荷载；当整个管重仅为线性支撑时，管壁最大的计算拉应力不得超过 f_{cr}。美国混凝土压力管协会 ACPPA 认为该条件经与其他标准对比和工程实践检验是安全的。

6.2 弯矩和轴力

6.2 节的条文内容给出管体弯矩和轴力的计算方法。管体上的土压力分布及由永久荷载和可变荷载在管壁中引起的弯矩和轴力按照 Olander（1950）理论确定，管道-土壤体系的敷设设计选用 Olander 描述的管基中心角。

对于混凝土管应力分析时土压力分布的假设，Paris（1921）提出了最常用的假设方法，假设垂直土压力是均匀分布在管的水平宽度上，侧向荷载施加在管的两侧并延伸到管的整个高度，其受力图是梯形的，荷载沿管底部宽度方向呈均匀分布。Olander 认为，刚性管敷设在土弧基础上的压力分布图形为奥兰特分布图形（Olander's bulb form distribution），即：土压力和地基反力均为余弦曲线形的灯泡形分布图形，最大压力位于管顶点和管底点，土弧基础中心角外缘处压力为零，管周围荷载和压力的分布假设是关于垂直中轴对称的，如图 4 所示。

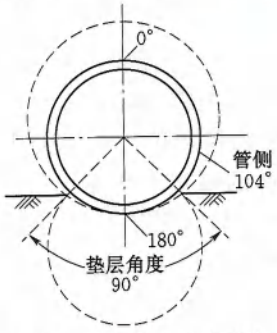


图 4 垫层角为 90°时的覆土荷载分布图

抵抗外部荷载的效应分布在管底，限制在一个特定的中心角（即基础支承角）中，该中心角的界限取决

于管基的埋设弧宽度，设计通常使用 90°。在水平基面铺设的管道，支撑管重的中心角应为 15°，除非另行规定用更大的管基角度支撑管重。

6.2.1、6.2.2 条文分别给出了管壁弯矩和轴力的计算公式。公式是由 Zarghamee 和 Fok 在 1990 年提出的，弯矩和轴力系数根据 Smith. W. W 在 1978 年给出的取值。

6.2.3 在荷载作用下，当管芯混凝土产生微裂缝或可见裂缝，管底和管顶软化，PCCPE 钢筒屈服时，管侧弯矩突然增大，管底和管侧的弯矩比减少，发生弯矩重分布现象。本条文中弯矩重分布分析方法是由 Zarghamee、Fok 和 Sikiotis 在 1990 年共同提出的。当弯矩 M_1 大于管底的抗弯能力（M_{1cap}）时，则管底和管侧弯矩 M_1 和 M_2 将会发生弯矩重分布。

PCCPE 的 M_{1cap} 为钢筒达到应力极限时管底弯矩 M_1 的极值，其值可按表 6.4.2－1 中弹性极限状态设计准则的钢丝极限应力 f_{sg}：$-f_{sr}+nf_{cr}+\Delta f_s \leqslant f_{sg}$ 和管芯混凝土抗压极限：$f_{ci} \leqslant 0.75\ f'_c$ 相关公式计算。而对于 PCCPL，在管芯混凝土开裂之后，保护层达到压应变极限时的管底弯矩 M_1 的极值为 M_{1cap}，其值可按表 E.0.6－4 及式（E.0.6－4）计算。

6.3 预 压 应 力

6.3.1～6.3.4 条文中给出了初始预压应力和最终预压应力、抵御压力的计算公式。Zarghamee 在 1990 年指出，在计算混凝土管芯、钢筒和预应力钢丝的剩余应力时，要考虑混凝土的弹性变形、徐变和收缩及预应力钢丝松弛的影响。固有钢丝应力松弛、徐变系数和收缩应变，可以遵照 ACI 委员会 209 推荐的方法和步骤进行计算。

6.3.5 混凝土的弹性模量比的取值说明。

（1）预应力钢丝、钢筒与管芯混凝土的弹性模量比由表 6 计算得出。表中的模量比关系为：$n'_i=1.07n_i$，$n'_r=1.07n_r$。

表 6　预应力钢丝、钢筒与管芯混凝土的弹性模量比公式表

项　目		弹性模量比	
		浇筑混凝土	离心混凝土
缠丝时	n_i	$109(145f'_c)^{-0.3}$	$100(145f'_c)^{-0.3}$
	n'_i	$117(145f'_c)^{-0.3}$	$107(145f'_c)^{-0.3}$
制成后	n_r	$93(145f'_c)^{-0.3}$	$95(145f'_c)^{-0.3}$
	n'_r	$99(145f'_c)^{-0.3}$	$102(145f'_c)^{-0.3}$
注：f'_c的单位为 MPa。			

（2）抗压强度试验采用蒸汽养护的浇筑混凝土和离心混凝土试件，试验结果与养护时间 t 相关，混凝土模量随时间变化，因此弹性模量比 n、n'公式表达为：

浇筑混凝土：

$$f'_c(t)=\frac{f'_c}{0.87+\frac{4}{t+2}} \tag{12}$$

离心混凝土：

$$f'_c(t)=\frac{f'_c}{0.96+\frac{1.4}{t+6}} \tag{13}$$

（3）混凝土的弹性模量必须要通过相关试验的验证。如果试验测得混凝土的弹性模量低于式（3.1.4－2）的计算值，那么就要对该管道的混凝土弹性模量设计值进行修正。

PCCP 混凝土的弹性模量试验应按照 SL 352 的要求制作和养护至少 5 组混凝土圆柱体试件，测定 28d 龄期混凝土的弹性模量，以 5 组试件的平均值作为弹性模量测试结果。同时，再按照相同的要求制作 5 组混凝土圆柱体试件，并按照 SL 352 的规定进行抗压强度试验，计算 28d 龄期混凝土抗压强度平均值$\bar{x}$及这 5 组试件的标准偏差值 S。

混凝土 28d 抗压强度配制强度为：

$$f'_{ct}=\bar{x}-0.84S \tag{14}$$

上述试验是为了确保 f'_{ct}在 31.0～44.8MPa 之间。

弹性模量修正系数为：

$$C_E = \frac{E_{ct}}{0.074\gamma_c^{1.51}(f'_{ct})^{0.3}} \tag{15}$$

式中 γ_c——取 2323kg/m³；

E_{ct}——5 组或 5 组以上混凝土弹性模量的平均值，MPa。

如果混凝土弹性模量修正系数 C_E 低于 0.9，则需要降低混凝土弹性模量设计值，对式（3.1.4-2）求得的弹性模量值乘以修正系数 C_E 作相应减少，并对弹性模量比除以 C_E 作相应调整。

6.3.6 预应力钢筒混凝土管道暴露在外环境条件下，混凝土和砂浆易发生徐变收缩，从而引起预应力损失，这一损失与暴露的环境和天数有关，影响管道结构计算结果，因此必须考虑徐变和收缩对管道结构的影响，具体计算见附录 D。

6.4 管道设计准则

我国 PCCP 的制造、设计主要参照美国 ANSI/AWWA C301、ANSI/AWWA C304 等标准。我国 1989 从美国引进 PCCP 技术和关键设备，发展至今已经制造出 4000 多 km PCCP，最大管径已达 4m，这些 PCCP 工程是按 ANSI/AWWA C304 等标准进行设计的，目前尚未出现因为 PCCP 结构设计原因发生的事故。2005 年发布实施的 GB/T 19685—2005《预应力钢筒混凝土管》，是在修改采用美国标准 ANSI/AWWA C301《AWWA Standard for Prestressed Concrete Pressure Pipe, Steel-Cylinder Type》基础上编制的，其基础标准采用了我国国家标准或行业标准。本标准管道结构计算部分的设计方法和基本计算公式采用美国标准 ANSI/AWWA C304《AWWA Standard for Design of Prestressed Concrete Cylinder Pipe》，材料参数和试验符合我国现行标准，在引进、消化、吸收国外标准和研究成果的基础上，实现标准中国化。主要参考了 Zarghamee, M. S.、Heger, F. J.、Dana, W. R.、Fok, K. L.、Sikiotis. E. S.、

Ojdrovic，R. P.、Bazant，Z. P.、Kim，J. K.、Panula. L.、Raphael，J. M. 等公开发表的关于预应力钢筒混凝土压力管（PCCP）的研究成果，同时也参考了 ACI.、ASTM、ANSI/AWWA C301、AWWA M9 和 AWWA M11 等标准，这些研究成果和标准综合反映了美国混凝土压力管工业 70 年的实践经验和经验数据。

根据国内大量的实际工程资料，分别采用本标准规定的结构计算方法和美国相关标准的方法进行比对计算，得出的钢丝面积结果相差±1%左右。采用本标准进行管道结构计算，其结构设计安全水平与美国标准相当。

6.4.1 条文中规定管道结构计算应该遵守的三种极限状态设计准则：

（1）本标准中采用的工作极限状态设计准则、弹性极限状态设计准则、强度极限设计准则主要考虑的是管壁单位圆环内由内压、外荷载、管重和管内水重引起的极限轴力和极限弯矩。准则通过极限拉应变、应力、内力等各种极限数值来判定能否使管体合格。此设计方法是基于混凝土结构方面技术发展水平与混凝土结构工程实践导出的方法。

（2）极限状态设计为了能让预应力钢筒混凝土管在承受正常设计荷载时，确保管道处于正常的使用状态，甚至在非正常荷载情况下导致管壁出现裂缝，也能保证预应力状态和安全系数满足管道的正常使用。

6.4.2 管道计算应遵守三种极限状态设计准则：

（1）工作极限状态设计准则有五个控制条件，应符合下列要求：

1）混凝土管芯表面的拉应变在工况 W1 时为 $\varepsilon'_w=1.5\varepsilon'_t$，在工况 FT1、WT1 及 WT2 为 $\varepsilon'_k=11\varepsilon'_t$。

此应变极限由管芯裂缝控制，控制混凝土管芯表面的最大拉应变。此项控制避免管芯内表面在 W1 工况下产生微裂缝或在 FT1、WT1、WT2 工况下出现可见裂缝。此应变分析基于混凝

土和砂浆的受压受拉应力—应变线性关系，以及管侧弯矩和轴力的共同作用。在内压很大的情况下，管底或管顶的保护层应变仍在软化范围内。此分析方法基于假设预应力钢丝和钢筒都是线弹性行为，受拉混凝土和砂浆出现微裂缝后仍会继续承受部分拉力。

在工况 FT1、WT1 及 WT2 下，外层管芯混凝土的极限应变和内层混凝土的极限应变同为 $11\varepsilon'_t$。因为外层砂浆的极限拉应变总是比外层管芯混凝土的应变大，在工作荷载加偶然荷载时，外层混凝土极限应变并不会影响管道的正常使用。

2）工况 FW1 和工况 WT3 时，内层混凝土与钢筒之间径向拉应力的最大计算值应为 0.082MPa。

此项是控制内层混凝土与钢筒之间的径向拉力，在外荷载下，PCCPE 发生弯曲和产生径向拉力，使内层混凝土和钢筒脱离，导致管底或管顶和钢筒出现早期裂缝。通过三轴承压试验，在径向拉应力极限情况下，管芯会出现第一条可见裂缝。为防止这种情况发生，在管道处于工况 FW1 和工况 WT3 时，内层混凝土和钢筒界面的径向拉应力最大值不应超过 0.082MPa，在只有工况 W2 和工况 FW1 时，管道的外荷载最大径向拉应力取初裂时保护层砂浆的极限拉应变的 0.8 倍。

随着内压增加，管芯内层和钢筒之间的径向拉应力减少。因此，管道在不受内压的情况下，径向拉应力的极限状态并不会影响管道设计。

3）砂浆保护层的拉应变在工况 W1 为 $\varepsilon'_{wm}=0.8\varepsilon'_{km}$，在工况 FT1、WT1 及 WT2 为 $\varepsilon'_{km}=8\varepsilon'_{tm}$。

此项由保护层裂缝控制。在特殊荷载组合条件下，砂浆保护层极限应变会使管体出现微裂缝。但此微裂缝并不会影响砂浆保护层的性能，仍然能保护钢丝不被腐蚀。在工况 W1 条件下，外层砂浆保护层的极限应变为初裂时保护层砂浆应变极限值的 0.8 倍，外层混凝土管芯的极限应变会导致微裂缝的出现。

4）混凝土管芯内表面最大压力在工况 W2 为 $0.55f'_c$ 和

$0.65f'_c$。

此项控制混凝土管芯混凝土内表面最大压应力，避免管芯混凝土承受过大的塑性压应变。塑性变形是微裂缝产生的结果，还有可能导致塑性压缩模量降低，会影响预应力的大小。所以管芯内表面的最大压应力在工况 W2 条件下不得超过 $0.55f'_c$，WT3 条件不得超过 $0.65f'_c$。

5）最大内水压力：

PCCPE：工况 W1：P_0，工况 WT1：$\min(1.4P_0, P'_k)$

PCCPL：工况 W1：$0.8P_0$，工况 WT1：$\min(1.2P_0, P'_k)$

式中 P'_k——最大极限压力。

P_0 单独作用时，该压力产生以下应变：①保护层 $0.5\varepsilon'_{km}$ 的微应变；②PCCPE 管芯混凝土产生 $0.41\sqrt{f'_c}$ MPa 的轴向拉应力；③PCCPL 管芯混凝土产生 $0.25\sqrt{f'_c}$ MPa 的轴向拉应力。该轴向拉应力值最小。P'_k 利用净截面未开裂状态计算。

（2）弹性极限状态设计准则有两个控制条件，应符合下列要求：

1）管体在 FWT1、FWT2、FT2 工况下，安全系数仍为 PCCPE 取 1.1，PCCPL 取 1.2。部分管壁必须考虑由预应力、内压、管自重、流体自重和外荷载产生的轴力和负弯矩。当弯矩或内压增大时，预应力钢丝的拉力也会增大，但钢丝弹性极限应力不应超过钢丝总缠绕应力 f_{sg}，管侧最大压应力不超过 $0.75f'_c$。极限应力下钢丝应力应变并不是线性关系。因此，当钢丝受拉应力大大超过 f_{sg} 时，钢丝的非线性应力应变关系会导致保护层开裂。在过大应力下，钢丝会发生永久变形和预应力损失。管芯在过大的压力下，会发生塑性变形、弹性模量降低以及预应力损失。

2）WT1、WT2、FT1 工况下，PCCPE 的钢筒最大拉应力应大于钢筒的最小拉伸屈服强度 f_{yy}，可以防止钢筒发生永久变形；WT3（零压力）工况下，钢筒的拉应

力也不得超过钢筒的预压应力，防止钢筒与外部管芯混凝土分离，只适用于 PCCPE。尽管内压会增加钢筒的拉应力，但内压力也会在钢筒与外层混凝土产生压力。

在组合荷载作用下，钢筒承受较大的压应力，主要是由预应力的弹性作用和管芯的徐变压缩作用引起的。在缺少内水压力作用下，随着弯矩的增加，钢筒预压应力会减小，直到钢筒不受应力作用，在钢筒内任何多余的弯矩都能产生拉力。在管芯内层产生裂缝时，钢筒的拉力就可能使钢筒形状变为扁平状，且容易与外层管芯发生脱离。当管道在足够大的内水压力情况下，内层管芯和钢筒接触界面处的径向压力能够防止两者之间脱离。

（3）强度极限状态设计准则有三个控制条件，应符合下列要求：

1）在工况 FWT3、工况 FWT4 时，预应力钢丝最大拉应力不得超过钢丝屈服强度 f_{sy}。

本标准建议安全系数 β_2 为 PCCPE 取 1.3，PCCPL 取 1.4。钢丝屈服时，随着荷载减小，砂浆保护层的裂缝可能不会闭合，从而使钢丝遭到腐蚀。此外，钢丝达到屈服强度产生的应变偏移能导致很大的预应力损失，影响管道的耐久性。

2）在工况 FWT5 时，管侧的最大组合弯矩和轴力应不超过管芯混凝土极限抗压强度，避免管芯混凝土发生破坏。

3）在工况 FWT6 时，预应力钢丝应力保持在规定的最小抗拉强度值以内。

本标准采用的设计方法不仅考虑到管壁截面的弯矩特性、管顶和管底的刚度降低，以及 PCCPE 的钢筒屈服，还有在此情况下发生的弯矩重分布现象。内压、外荷载、管重、流体自重产生的轴力导致管壁截面产生弯矩，管顶和管底刚度降低导致混凝土开裂。

在具体设计时，为了满足本条文中的三个极限状态设计准

则，每一种极限状态的组合工况情况必须进行计算。为此，在三个极限状态设计准则中，管壁弯矩和轴力的组合情况同样必须进行计算，并考虑管壁横截面开裂与未开裂两种情况。为了精确计算上述弯矩和轴力的组合情况，混凝土和砂浆的基本性能必须明确。

6.5 管道稳定及地基承载力

6.5.1 **抗浮稳定安全系数 K_f 的取值与现行水利行业标准相关规定一致。**

6.5.5 地基岩土分类参照 SL 265《水闸设计规范》规范附录 F。

7 构造规定

7.1 管 体

7.1.1 条文内容主要参照美国标准《预应力钢筒混凝土压力管设计标准》(ANSI/AWWA C304)的有关要求。

7.1.2～7.1.4 条文内容主要参照美国标准《预应力钢筒混凝土压力管》(ANSI/AWWA C301)的有关要求。

7.2 配件和异形管

7.2.1 配件主要包括弯管、T形三通管、Y形三通管、变径管、铠装管及用于连接支线、人孔、排气阀、排空阀所需的各类管件。

7.2.5 本标准对配件管壁最小厚度的规定与SL 281《水电站压力钢管设计规范》是一致的。规定的最小厚度主要是为了在施工中使钢管有一定的刚度，不致产生很大的圆度。按本条规定取厚度后，仍须设加劲环或临时支撑。

7.2.9 本条规定了配件的内外表面应配置焊接钢筋网及水泥砂浆、混凝土内衬和外保护层的技术要求。管件内衬和外保护层多采用水泥砂浆，砂浆强度等级不低于M30。

7.2.10 异形管是指基本结构与标准管相同，只作了部分修改的管件。在某些非标准管段中，采用异形管比采用配件更为经济。可以用单一斜口管或一组斜口管实现管线的水平或竖向偏转，以避开工程占地范围内的地上物，或者用一组斜口管代替弯管以避免设置镇墩等止推装置。斜口管具有与钢筒相连的插口钢圈，偏转角度在5°以内，以适应与管线方向的较小变化。管线中的小曲率和小角度变化可通过标准管、斜口管、斜口承接管或这些管件组合的接头偏转角来完成。

7.3 管道接头

7.3.1 预应力钢筒混凝土管采用承插口接头和滑动O形胶圈密封，其钢制承口和插口加工尺寸精度高，承口呈钟形，具有安装自定位的作用；插口是带有单凹槽或双凹槽的特制型钢，密封橡胶圈按照凹槽断面设计，填充在凹槽内，安装好以后的橡胶圈受双向挤压，形成很好的密封性和适应地基变形的能力。

7.3.3 预应力钢筒混凝土管为承插口连接，在管道方向改变处、管径变化处、检修阀处或者分水口处，需设置镇墩来承担由水压力产生的不平衡推力。在管径大、压力高时，采用镇墩较不经济，这时较好的方法是采用限制性接头。山西万家寨引黄工程联结段和辽宁大伙房水库输水（二期）工程均采用了限制性接头，效果较好。钢筒厚度需通过计算确定。

7.4 管道基础

7.4.1 预应力钢筒混凝土管属于刚性管，其外压承载能力较大，通常都采用土弧基础。土弧基础的计算支承角，一般采用90°～120°作为设计条件。考虑到实际施工时对管道的稳管定位、纠正偏差等因素，施工采用的土弧基础支承角2α宜适当留有余地，即比计算支承角增大20°～30°。设计人员应根据土质条件、管径、施工配套技术等因素综合考虑。

7.4.2 本条规定与GB 50268的要求一致。

8 防腐涂层

8.1 一般要求

8.1.1 环境分类可参照 SL 191《水工混凝土结构设计规范》。

8.2 外表面涂层及涂料技术性能

8.2.1 预应力钢筒混凝土管道外表面砂浆层具有较强的碱性，在强碱的长期作用下，普通涂料成膜树脂中的分子链将加速老化，影响防腐涂层的使用寿命。因此，管道外表面防腐涂层应具有较强的耐碱性能。防腐涂层与混凝土之间粘结良好是涂层能否起到保护效果的前提，因此，管道外表面防腐涂层与混凝土之间应具有较好的附着性能。另外应具有较好的抗氯离子渗透性能。

8.2.2 常用于防腐蚀保护的涂料有聚乙烯类、氯磺化类、呋喃树脂类、环氧树脂类、丙烯酸类、氟树脂类等涂料。但是用于地下管道防腐蚀，环氧树脂类涂料由于具有黏聚力好、耐酸耐碱等特点，防腐效果最好，因此规定采用环氧类涂料或改性环氧类涂料。改性环氧类涂料包括呋喃树脂改性环氧、丙烯酸树脂改性环氧、有机硅改性环氧、氟碳树脂改性环氧等。目前在地下管道防腐蚀中应用最多的是环氧煤沥青涂料，具有很好的防腐蚀效果和性价比。不得采用环氧沥青涂料。

8.2.3 底漆应具有较低的黏度，才能渗入砂浆层内部，所以表 8.2.3－1 中规定底漆黏度小于 20s，为避免仅依靠提高溶剂比例来降低黏度，同时规定了底漆的固含量不小于 40%。底漆应具有固化快的特点，以便后道工序的跟进。表 8.2.3－2 规定了面漆的物理性能，应采用高固体含量面漆。

8.4 质量检验

8.4.1 第一次供货或在涂料配方调整、原材料或生产工艺有重

大调整时，涂料厂家需提供表 8.2.3－3 所列指标检测结果。涂料运到现场后应对涂料进行物理性能的抽检，底漆应满足表 8.2.3－1 的要求，面漆应满足表 8.2.3－2 的要求，只有抽检合格才能施工。

8.4.3 涂装结束后涂层质量检验：

1 涂层外观应无流挂、龟裂、可见针孔、气泡、脱落等缺陷这是保护涂层的基本要求。

2 在混凝土表面测定干膜厚度较为复杂，一般的磁性测厚仪无法工作，可采用超声无损涂层测厚仪、读数显微镜式测厚仪及千分尺等工具。超声无损涂层测厚仪的优点是不破坏涂层，缺点是精度不够。当对涂层厚度有争议时，以读数显微镜式测厚仪测试为准。

3 现场测试涂层与混凝土基材之间附着力的试验方法主要有划格法和直接拉开法，划格法得到的是定性的结果，没有拉开法直观。本标准采用直接拉开法测试涂层与基材之间的附着力。对于环氧树脂类涂料，只要树脂含量足够，固化体系合理，操作规范，其与混凝土基材之间的附着力均能达到 1.5MPa 以上，另外参考了国内外相关标准对混凝土表面涂层附着力的要求，规定管道外表面保护涂层与混凝土基材之间的附着力应不小于 1.5MPa 或混凝土表面抗拉强度。

9 阴极保护

9.1 一般规定

9.1.1 预应力钢筒混凝土管道（PCCP）的预应力钢丝外层砂浆密实度很高，能有效阻止土壤或地下水中有害物质的侵入，而且砂浆的高碱性为钢丝提供了钝化环境，促使钢丝表面形成稳定的钝化膜，保护钢丝和钢筒不腐蚀。但是砂浆保护层即使最密实，还是存在一系列不同孔径的孔隙；在使用过程中也会由于各种原因导致砂浆层产生裂缝。因此在一定的埋设条件下，例如高氯离子含量或酸性环境中，土壤和地下水中的氯离子、酸性物质会通过砂浆层中这些孔隙渗入到钢丝表面，导致钢丝发生腐蚀而断裂破坏。我国 PCCP 的使用年限不长，还没有出现 PCCP 腐蚀失效事例，但从应用历史较长的美国等国家的运行情况来看，PCCP 腐蚀失效时有发生，美国在 1942 年开始生产并安装 PCCP，从 20 世纪 70 年代开始，陆续发生 PCCP 损坏事件，据 2003 年统计，30 多年内发生 500 多起 PCCP 失效事故。美国混凝土预应力管协会（ACPPA）对 118 个失效的 PCCP 工程进行了性能和损坏原因调查，结论证实了 PCCP 失效大多数是与预应力钢丝的腐蚀有关。利比亚大人工河工程，一期工程于 1983 年 11 月 6 日正式开工，1991 年 8 月 28 日竣工，包含 2 根直径 4000mm，共计长 1536km 的 PCCP 管线。出于降低工程造价的考虑，部分管道没有采用阴极保护，结果在运行过程中管道被腐蚀而引起爆管，造成严重损失。

PCCP 一旦腐蚀破坏，维修较为困难，因此有必要对 PCCP 采取有效的防腐蚀措施，目前阴极保护被认为是阻止腐蚀最有效的方法。对于已遭受腐蚀的在役 PCCP 可采取阴极保护措施制止腐蚀继续发展；对于新建管道，作为预防措施（也可称为阴极防护）可防止其今后可能发生的腐蚀是否对新建 PCCP 管道采取阴

极保护，应在综合考虑管道埋置环境的腐蚀性、工程的重要性、运行检修条件、经济性等因素的基础上确定。

9.1.2 向被保护的预应力钢筒混凝土管道表面提供足够的阴极电流，使金属构件阴极极化到电位负于一定值而进入稳定区或钝化区，以保证在热力学上金属构件比其腐蚀产物更稳定或者在动力学上腐蚀速度足够低，这种电化学防腐蚀保护技术称为阴极保护。实施阴极保护有牺牲阳极和强制电流两种方式。牺牲阳极方式是在被保护的管道上电连接一种电位更负的金属或合金，通过加速其消耗为被保护管道提供阴极保护。强制电流方式用直流电源通过辅助阳极给被保护的管道提供阴极电流，保护系统主要由直流电源、辅助阳极、参比电极和各种电缆等组成。由于牺牲阳极维护管理较方便，目前 PCCP 管道大部分采用的是牺牲阳极阴极保护。

9.1.3 电连续性和电绝缘是预应力钢筒混凝土管道的阴极保护的必要条件。电连续性是为了保证阴极保护电流能均匀地流到所要保护的各部位，因此钢筒和钢丝之间、管节之间均应进行电连接。管道的电绝缘则可以限定阴极保护电流的流动，确保电流用于阴极保护。

9.2 阴极保护准则

评价阴极保护是否充分可以从热力学和动力学两个角度考虑，在热力学角度即将钢阴极极化到钢的稳定区，在动力学角度就是将钢的腐蚀速度降低至可以接受的程度。目前，钢混结构阴极保护中用得较多的保护准则有极化电位准则和极化形成/衰减值准则两种。

RP0100－2004 中给出的保护准则为：极化电位不负于－1000mV（相对于 CSE），极化形成/衰减值大于 100mV。当管道处于地下水中时，由于钢丝和钢筒表面氧气少，极化衰减困难，这种情况下采用极化衰减 100mV 的准则不是很合适，可采用极化电位负于－800mV（相对于 CSE）为下限值。

极化电位是被保护金属/电解质界面上的保护电位，它反映真实的保护状况。应采用预先埋设在金属表面附近的长效参比电极或极化探头测量极化电位。采用便携式参比电极在地表测量时，应采用断电法以消除土壤和混凝土保护层的 IR 降。

第一次（断电瞬时）测量和第二次（去极化一段时间）测量时混凝土的温度和湿度有显著变化时，保护准则的极化衰减可能无效。

9.3 阴极保护系统设计

9.3.1 预应力钢筒混凝土管道阴极保护的设计一般需要掌握下列资料，设计人员应在设计之前通过对资料收集和现场勘测获取。

（1）管道参数：包括预应力钢丝、钢筒、砂浆和混凝土等材料的类型与等级，尺寸（长度、直径和厚度等），外防腐涂层的种类、厚度和完整性，管道埋深高程、地下水高程、气候条件、冻土层等。

（2）阀井、电绝缘接头、管节之间及内部的电连接、套管等类型、结构和位置。

（3）穿越河流、铁路、公路的情况，邻近埋设金属构筑物的相对位置和防腐蚀措施，与其他金属构筑物电绝缘的可行性等。

（4）架空高压输电线路或埋地高压电缆的位置、走向及额定电压，邻近交直流电气化牵引系统的特性参数、变电站位置等干扰源的情况。

（5）已有阴极保护系统的情况、运行及维护管理资料。

（6）电源的可利用性，邻近可用于远距离监测的系统类型和位置。

（7）沿线地形地貌和土壤理化性能，包括土壤电阻率、pH 值、氧化还原电位、SO_4^{2-}、Cl^- 含量、腐蚀性细菌以及污染程度。

（8）阴极保护设计使用寿命，所需阴极保护电流密度等。

9.3.2 在保护单元内，所有金属部件均应具有良好的电连续性。金属部件之间的电连接可通过焊接或机械连接的方式，但预应力钢丝应避免直接焊接。大多数情况下，管节内预应力钢丝和钢筒之间的电连接在管节预制时进行，可在预应力钢丝下压接导电薄钢带，再将导电钢带与钢筒通过电缆焊接成一整体。埋置式预应力钢筒混凝土管每节管道可沿管芯纵向安装 2 条约成 180°布置的薄钢带，作为环向缠绕预应力钢丝的导电钢带。薄钢带其中一条宜位于预应力钢丝锚具附近，其横截面宜为 20mm×2mm，接触预应力钢丝的一面两侧的直角应作圆弧过渡。管节之间的电连接可预先焊接在管节两端承插口上电跨接用钢片，再用电缆或钢条焊接，跨接用钢芯电缆截面不宜小于 $10mm^2$，电缆焊接可采用铝热焊方法。每一步电连接均应进行电连接性的检测和评定。

9.3.4 带状牺牲阳极有利于保护电位的均匀分布。

9.3.5 强制电流阴极保护的辅助电极一般选用与预应力钢筒混凝土管道平行布置的带条阳极，以保证管道保护电位的沿轴向均匀分布，避免局部过保护。

9.3.6 阴极保护测试装置是用来判断保护的效果或监控运行状态。阴极保护测试装置应与阴极保护系统同步安装。

测试装置包括测试端子、测试探头与监测设备等。测试探头由参比电极、极化测试探头或试片等。测量电位时应考虑 IR 降的影响，在杂散电流干扰影响区域或牺牲阳极难以与被保护管道断开时，应采用极化探头（试片）断电测量技术进行电位测量。

当管道穿过无人地区或很难接近的地方，应当采用远距离监测、遥感技术或其他数据传输系统。

10 施 工 安 装

10.1 施 工 准 备

10.1.1 在工程施工前，管道设计所需的资料要齐全。管子的壁厚与配筋、混凝土强度等级最终由管子生产单位依据原材料、覆土、设计规定的压力值等计算确定，由生产单位对管子质量负责，设计单位对生产单位的设计应予以复核。不同的壁厚与配筋的组合根据计算都可以满足设计要求时，生产单位可根据自己的情况设计选用。

10.1.2 施工前一般要编制预应力钢筒混凝土管道采购及安装指导性规范，确保高质量管道所必须的制造工艺控制要求，并提出安装管道需求计划等技术准备。这些是为了有利于管子的安装，避免长期裸露存放对保护层造成影响，管子对存放时间有一定的要求，应尽量控制管子留置时间，为此，应要求厂家按安装要求，适时生产所需要的管子。不同覆土厚度区管子型号不尽相同，不能相互替代，为保证生产与安装的一致性，以保证工程整体进度，制定详尽的管子采购、安装计划非常必要。

10.2 运 输

10.2.1 对出厂与交货的约定是为了保证到达现场供使用的管子质量合格，并与安装需求管子标准一致。

10.2.2 主要考虑预应力钢筒混凝土管子的结构特点，严禁使用绳索进行穿心吊，以避免装卸过程中吊具对管子接触面造成损伤；使用专用吊具时，应充分考虑吊具与管壁的接触面积，以保证装卸操作中管子的安全。

10.2.3 大口径预应力钢筒混凝土管道一般是采用平板拖车、低凹心平板拖车或有轨平板车从制造商的停放场运输到安装地点，也可使用铁路拖车和驳船运输，大口径管子一般采用专用的驮管

车运输以降低运输高度。采用何种运输方法取决于运输费用的比较、运输的可达性及工地的接受能力。预应力钢筒混凝土管是一种坚固的管材，但在运输过程中必须采用适当的支撑和保护措施，以免对管道造成破坏。应当注意防止管端的碰撞及对其造成的损坏。

10.2.5 对于大口径管子，出厂时要标记其摆放位置，以便于运至现场存放时可保持与出厂时横轴、立轴的相同摆放位置，以保证管子承、插口椭圆度变化趋势一致，便于管子的对接安装；试压孔应在管子下部低于120°的部位，保证下步要做的接头打压试验工作方便。

施工中要协调管子的生产与安装的一致性，管子堆放时间过长，不利于对管子的保护，尤其是表面砂浆保护层与防腐结构层裸露时间长，会受阳光照射等的影响。

10.3 沟槽开挖与回填

10.3.1 要求受地下水位影响的工程区段，在符合GB 50268的基础上，强调做好详细的沟槽开挖、管道安装和回填的施工组织工作，以控制降水时段，原因是：①降低降水成本；②长时间降水容易造成对周围环境与民众的影响，沟槽长时间裸露，也增加安全风险。

10.3.2、10.3.3 规定了设计未作明确要求时，沟槽开挖底宽的参考值，沟槽底宽度还与管道的安装方法等相关，沟槽开挖边坡、支护等，应依据设计或相关国家或水利标准拟定。

10.3.4 预应力钢筒混凝土管道需要注意保持管道纵向支座（垫层）的连续和均匀，并需避免在管道的某一端形成强约束，防止管道发生纵向断裂和承口破裂，安装施工中必须高度重视管道纵向的结构安全问题，防止预应力钢丝受损坏，造成管道破坏。

管道垫层对其外部荷载承受能力有重要的影响，它是管道结构设计中的一个控制因素。设计管道时，必须确定垫层对管道、水及覆盖层荷载的支撑方式，垫层的支撑程度和均匀度都会对所

要求的管道强度产生的影响。管道外层防腐涂层或砂浆为其内部钢构件提供抗侵蚀保护，去除管道周围回填材料中的较大块石和瓦砾很重要。

10.3.5 预应力钢筒混凝土管道接口一般采用二次打压检验，重要工程可根据情况增加接口打压检验次数。南水北调中线预应力钢筒混凝土管道工程，采用三次接口打压，其三次打压时期分别为：管道安装对接好后第一次打压；安装完后续三节管后第二次打压；管沟回填覆土至管顶上 500mm 时第三次打压。

10.3.6 管槽回填施工要符合 GB 50268 的有关规定。

10.3.7 明确了沟埋式管道管周回填土土质及密实度要求。埋地管道的受力状态不完全取决于管体本身的结构性能，而与周围土体密切相关。本条规定了回填土的分区密实度要求，加强管侧土体的支承作用，使其受力得到改善，可充分发挥管体的承载能力。预应力钢筒混凝土管为刚性管道，对于管顶上面 0.5m 以上的区域，管沟回填应符合本条规定外，还应满足地面工程（包括道路工程或堤防工程等）回填压实要求，遇到有矛盾时应由设计单位提出处理方案。本条规定提出了管周边回填土最大粒径要求，主要考虑到预应力钢筒混凝土管外层为水泥砂浆或外防腐层，对内部钢丝保护至关重要，一旦被含大粒径的土质破坏，将影响管道运行安全。

10.4 管道安装与敷设

10.4.1 对管道的外观质量作出一般性的规定，不符合该要求的管节，外观质量不合格。

10.4.3

3 规定了管道安装接头的检查要求，凡本条款未作规定的，应符合 GB 50268 的有关规定。

4 规定了管道安装时最大与最小的轴向间隙值。

5 规定了管道安装时的水平方向偏差和垂直方向偏差值。南水北调预应力钢筒混凝土管道工程中，水平、垂直向偏差值采

用±20mm。

6 预应力钢筒混凝土管接头允许有一定的相对转角，在线路设计中存在利用管道的相对转角作为设计偏转角（借角）的情况，在施工中也会存在安装偏差，因此规定单个接头处的设计偏转角和安装偏差的总相对转角不得大于设计管道接头允许相对转角。另外，施工完成后，还会因为其他原因（比如微小沉降等）出现角度偏差，因此在设计和施工中，总相对转角要尽量控制到最小，为后期可能出现的偏差留有转角裕度。

10.5 洞穿管施工

10.5.1 洞穿管施工为在已建成的隧洞、方涵内敷设预应力钢筒混凝土管道。洞内管道运输一般有两种方式：小型管道采用顶推法运输；大型管道宜采用专用的设备。隧洞长度较大时，宜采用专用运输设备；隧洞或方涵长度较短，使用专用设备不经济时，可考虑顶推法安装。南水北调中线北京段预应力钢筒混凝土管道穿越西甘池隧洞、崇青隧洞及部分道路时，主要采用隧洞内驮管运输车进行安装。

10.5.2 洞内管道安装，分段进行洞管之间的混凝土回填浇筑，管道安装与混凝土回填交替施工。南水北调北京段管道工程分段长度为20m。安装好的管道应采用合适的支撑措施，防止混凝土回填的浮力造成管道漂浮。

11 管道功能性试验

11.1 一 般 规 定

11.1.1 管道功能性试验是管道工程竣工验收之前履行的试验项目。管道水压试验是对压力输水管道工程中的管道、接头、管件、各种阀件及镇墩、连通、分水口等附属建筑物的设计、施工、安装阶段的综合验证；统计分析表明水压试验中确实存在不合格的可能。因此，竣工验收之前进行水压试验是必要的。应按设计要求确定采用压力管道水压试验合格的判断依据；当无设计要求时，应根据工程实际情况选用允许压力降值及允许渗水量值中的一项，或同时采用两项值作为试验合格的最终判定标准。

11.1.5 管道水压试验和管道闭水试验的分段长度采用了 GB 50268 的规定。对于长距离、大口径、管线附近无水源及排水困难的管道工程，实施难度大。若有充分论证或专项设计，可不受此分段长度限制。

11.2 接 口 水 压 试 验

11.2.1 压力管道接口的第一、第二次单口打压主要用于检验初期管道安装质量效果，并可及时拆除重新安装。因施工回填、地基不均匀变形及地下水位变化可能产生的接口变形或渗漏，可根据设计要求在管道水压试验前再次进行接口水压试验。

12 安全监测

12.0.1～12.0.9

（1）通过安全监测，可预测预报异常情况和管道安危状况，作出分析和判断，对不安全因素提出解决措施，确保预应力钢筒混凝土管道运用安全。监测断面和监测点的选择必须具有代表性，能说明问题。

（2）考虑到仪器设备失效普遍、不易更换，同种监测断面选择2个或2个以上断面，这样得到的数据互相之间有校核作用，以防有仪器安装失败，得到无效的数据。

（3）压力管道级别根据所在工程的等别和建筑物的重要性，按SL 252—2002《水利水电工程等级划分及洪水标准》来确定，凡属于下列情况之一者，应作安全监测：

1）1级、2级压力管道。

2）管径 $D_i \geqslant 3m$，或工作压力 $P_w \geqslant 1.0MPa$ 的3级压力管道，其所在工程的等别为Ⅱ等以上的。

（4）对管径 $D_i < 3m$，或工作压力 $P_w < 1.0MPa$ 的3级压力管道以及4级、5级压力管道，需要根据工程建筑物级别、工程规模及其重要性，专门论证后确定是否应作安全监测。

13 工 程 验 收

本章内容主要依据 GB 50268 的相关规定编写。

验收是政府依法设立的工程基本建设程序核心内容之一，是保障工程建设质量和安全，有效发挥工程效益的重要环节，其工作内容涉及行政性规定、程序性规定及技术性规定，是一项集行政管理与技术管理紧密结合于一体的工作。

附录 A　管顶垂直土压力计算

A. 0. 1　凸埋式状态是管道可能承受最大荷载的状态，先按凸埋管状态进行土压力计算，用计算出的土压力采用沟槽管土压力计算公式反算出沟槽宽度，即为过渡沟槽宽度 B'_d；当过渡沟槽宽度 B'_d 小于实际沟槽宽度 B_d 时，取凸埋管计算荷载作为管顶土压力值；当过渡沟槽宽度 B'_d 大于等于实际沟槽宽度 B_d 时，取沟槽管计算荷载作为管顶土压力值。当同一沟槽内管道根数大于 3 根时，位于沟槽中部管道应按凸埋管计算。

A. 0. 2～A. 0. 6　参照 AWWA M9 标准。公式以 Marston 荷载理论为基础，并列出各种土壤条件下的相关参数取值。回填土与沟壁未扰动的原土要经过相当长的时间才能形成凝聚力，故计算时不考虑凝聚力的作用。管道最终受到的土压力相当于管沟宽度 B_d、管顶以上所有覆土的重量减去或加上回填土与管沟壁产生的摩擦力。

本附录规定的计算方法对沟埋管和上埋管的分类明确，计算结果也与有限元分析结果较为接近，在土壤参数较为明确的情况下，可取得较为精确的计算结果。

附录 B　地面车辆荷载计算

B. 0. 1　本附录公路荷载计算仅针对整体式结构的刚性管道（一般指钢筋混凝土或预应力混凝土管道），规定了由车辆荷载作用在管道上的竖向压力，可通过结构的整体性，从管顶沿结构进行再扩散，使扩散范围内的管道结构共同承担地面车辆荷载的作用，充分体现结构的整体作用。

B. 0. 2　铁路荷载计算参照 TB 10002. 1—2005《铁路桥涵设计基本规范》。

附录C　弯矩和轴力修正系数表

本附录给出管道基础支承角在不同角度时，计算管顶或管底、管侧的弯矩和轴力公式所采用的弯矩和轴力修正系数。

Marston在1930年提出钢管上土压力是以灯泡形状分布的理论。1938年，该理论被美国垦务局用于盐湖渡槽设计中。1950年美国垦务局的Olander发表了“*Stress Analysis of Concrete Pipe*”，该文的理论和方法被广泛接受，经常被称为“Olander土基”。但基于当时的积分计算方法，只能分析土基45°、90°、120°和180°处的土压力。

Wayne W. Smith在1978年发表“*Stresses in Rigid Pipe*”，将Olander的土基理论用于实际，并通过计算机分析灯泡外弧在任意角度下的土压力，由此确定了弯矩和轴力修正系数。

附录 D　徐变和收缩参数

D. 0. 2　徐变系数和收缩应变的设计值 ϕ_1、s_1、ϕ_2、s_2 是把管道放置在室外露天环境 50 年得出的。根据制管完成、埋设和充水全过程管道所处的环境条件，在充水和压力测试之前，先把管道空置几天到几个月，管道会发生收缩损失；埋设后随着湿度的提高，管道恢复部分收缩损失，徐变和收缩的比例会降低；充水后管道会产生徐变和收缩损失，最大预应力损失只发生在最后阶段。其他情况应按如下规定进行测定：

（1）管道内外表面置于某特定相对湿度的室外环境下 270d。

（2）管道内外表面置于相对湿度 90%～95%的地下埋置环境下 90d。

（3）内表面在整个使用期置于 100%的相对湿度下（充水环境），同时外表面是在埋置环境下。

D. 0. 3、D. 0. 4　徐变系数和收缩应变是参照 ACI 209 的规定。该条中的徐变和收缩应变公式是由 Hansen 和 Mattock（1966）经过大量试验得出的结论。徐变系数和收缩应变与养护时间、相对湿度、比表面积、加荷时间、养护龄期、混凝土组成和浇筑方法有关。

相对湿度低于 40%时，管道徐变和收缩计算可参照 Bazant、Kim 和 Panula（1991，1992）的计算，相对湿度为 40%时，管道徐变和收缩增加很少，在此条件下的徐变系数和收缩应变可适用于干燥环境。

计算 PCCPE 内层混凝土和 PCCPL 砂浆保护层的徐变系数和收缩应变按照 ACI 209 的规定。但 PCCPE 外层混凝土的体表比不明确，因为砂浆保护层会阻碍管芯混凝土中水的流动。因此，根据扩散理论，外层混凝土徐变系数 ϕ_∞ 和外层混凝土收缩应变 s_∞ 都会受到砂浆保护层的影响。

外层混凝土徐变系数（不含钢丝）：

$$\phi_{co}=\frac{(h_{co}+h_{m})\,\phi_{com}-h_{m}\phi_{m}}{h_{co}} \tag{16}$$

外层混凝土收缩应变（不含钢丝）：

$$s_{co}=\frac{(h_{co}+h_{m})\,s_{com}-h_{m}s_{m}}{h_{co}} \tag{17}$$

徐变系数设计值 ϕ 和收缩应变设计值 s 是内外层混凝土徐变系数和收缩应变的平均值。该值与暴露的时间、相对湿度、体表比和加载龄期（仅限徐变）、固化时间（仅限收缩）、混凝土成分有关，还要考虑管道埋置后相对湿度的变化、离心浇筑混凝土的浇筑方法等诸多因素。

D.0.5 冷拔钢丝的力学性能应符合 GB/T 5223 中的相关规定。

附录 E　极限状态计算方法

预应力钢筒混凝土管结构计算算例说明：

（1）本附录对管道结构钢丝面积的设计过程是采用试算来完成的，即由管道结构几何条件，根据规范中对钢丝的最大和最小间距要求，确定能够满足规范要求的配筋最小面积和最大面积，然后从最小面积到最大面积，不断地用假定的钢丝面积值进行试算，直至找到能够满足极限状态设计准则的最小钢丝面积值。

（2）内力计算过程为：依据极限状态设计准则，对某一工况下的检验准则，通过应力应变计算，得到一个使得当前工况下内力和弯矩都平衡（即$\sum F=0$和$\sum M=0$）的应力应变参数v_2和k来完成（参数v_2和k也是采用反复试算的过程）。确定满足平衡的参数v_2和k值后，再根据检验准则验算当前工况下的应力应变条件。

（3）由于设计过程和内力计算过程需要大量试算，计算工作量非常大，人工完成难度大，中国水利水电科学研究院专门为本标准编制了一套设计软件 PCCP SL_DS 1.0。

为方便标准使用者对本标准的理解，以下给出了预应力钢筒混凝土管结构计算算例。

1. 设计条件

（1）管道类型：埋置式管 PCCPE。

（2）几何参数：

管道内径 $D_i=3600.000$mm；

钢筒外径 $D_y=3763.000$mm；

管芯厚度（包括薄钢筒）$h_c=230.000$mm；

薄钢筒厚度 $d_y=1.500$mm；

钢丝缠绕层数：2 层；

最小钢丝直径：6.0mm；

最大钢丝直径：7.0mm；
净保护层厚度（不包括钢丝直径）：20.000mm；
层间钢丝净距放大系数（1～2 倍钢丝直径）：1.000。
(3) 材料参数：
混凝土抗压强度标准值 $f_{cu,k}$=60.000MPa；
依据 3.1.3 条和 3.1.4 条：
混凝土抗压强度设计值 f'_c=48.000MPa；
混凝土抗拉强度设计值 f'_t=4.028MPa；
混凝土弹性模量设计值 E_c=28597.400MPa；
依据 3.2.2 条、3.2.3 条和 3.2.4 条：
砂浆抗压强度标准值 $f_{m,k}$=48.000MPa；
砂浆抗压强度设计值 f'_m=38.400MPa；
砂浆抗拉强度设计值 f'_{tm}=3.603MPa；
砂浆弹性模量设计值 E_m=25349.801MPa；
钢丝抗拉强度标准值 f_{su}=1570.000MPa；
钢丝弹性模量设计值 E_s=193050.000MPa；
钢筒抗拉屈服强度设计值 f_{yy}=227.500MPa；
钢筒抗拉强度设计值 f^*_{yy}=310.000MPa；
钢筒弹性模量设计值 E_y=206850.000MPa；
混凝土单位重量标准值 γ_c=24.000kN/m^3；
砂浆单位重量标准值 γ_m=23.500kN/m^3；
钢材单位重量标准值 γ_s=78.500kN/m^3；
水单位重量标准值 γ_f=10kN/m^3；
混凝土弹性模量修正系数 C_E=1.000；
混凝土徐变修正系数 C_ϕ=1.000；
混凝土收缩修正系数 C_s=1.000。
(4) 环境参数：
相对湿度 RH=70%；
堆放时间 t_1=270d；
埋置时间 t_2=1080d。

(5) 内压参数：

工作内压 $P_w=0.9$MPa；

水锤压力 $\Delta H_t=0.4P_w=0.36$MPa；

现场试验压力 $P_{ft}=1.2P_w=1.08$MPa。

(6) 覆土荷载：

管顶以上覆土厚度 $H=5.000$m；

埋置角度：90°；

敷设方式：沟槽管；

管道状态：凸埋状态；

回填材料单位重量：18.84kN/m^3。

依据附录 A 管顶土压力计算：管顶土压力 $F_{sk}=332.330$kN/m。

(7) 车辆荷载：依据附录 B 地面车辆荷载计算：

车辆荷载 $q=3.018$kN/m；

施工荷载 $W_t=0.000$；

依据 6.1.6 条（注 1），组合时，车辆荷载 q 与施工荷载 W_t 不叠加，取其中的较大值。

(8) 配筋参数。

(9) 弯矩和轴力系数：荷载（管基角 90°）：$C_{m1e}=0.1247$，$C_{m2e}=0.0885$，$C_{n1e}=0.3255$，$C_{n2e}=0.5386$。

管重（管基角 15°）：$C_{m1p}=0.2157$，$C_{m2p}=0.1016$，$C_{n1p}=0.1029$，$C_{n2p}=0.3026$。

流体重（管基角 90°）：$C_{m1f}=0.1208$，$C_{m2f}=0.0878$，$C_{n1f}=-0.2703$，$C_{n2f}=-0.0617$。

钢丝松弛：符合 GB/T 5223 标准；

钢丝缠绕总应力：$0.75f_{su}=1177.5$MPa。

2. 钢丝最大和最小配筋面积计算

根据 7.1.1 条，同层环向钢丝之间的最小中心距，对埋置式预应力钢筒混凝土管不得小于钢丝直径的 2 倍。同层环向钢丝之间的最大中心距不得大于 38mm。

根据最小钢丝间距要求可得到最大配筋面积，根据最大钢丝间距要求可得到最小钢丝面积。

(1) 采用 6mm 钢丝时：

最大钢丝间距 38mm，最小钢丝间距 12mm。

最大配筋面积：

$$A_s = \frac{\pi d^2}{4} \frac{1000}{d_{\text{最小钢丝间距}}} n_{\text{缠绕层数}}$$

$$= \frac{3.14 \times 6 \times 6}{4} \times \frac{1000}{12} \times 2 = 4710(\text{mm}^2)$$

最小配筋面积：

$$A_s = \frac{\pi d^2}{4} \frac{1000}{d_{\text{最大钢丝间距}}} n_{\text{缠绕层数}}$$

$$= \frac{3.14 \times 6 \times 6}{4} \times \frac{1000}{38} \times 2 = 1487(\text{mm}^2)$$

(2) 采用 7mm 钢丝时：

最大钢丝间距 38mm，最小钢丝间距 14mm。

最大配筋面积：

$$A_s = \frac{\pi d^2}{4} \frac{1000}{d_{\text{最小钢丝间距}}} n_{\text{缠绕层数}}$$

$$= \frac{3.14 \times 7 \times 7}{4} \times \frac{1000}{14} \times 2 = 5495(\text{mm}^2)$$

最小配筋面积：

$$A_s = \frac{\pi d^2}{4} \frac{1000}{d_{\text{最大钢丝间距}}} n_{\text{缠绕层数}}$$

$$= \frac{3.14 \times 7 \times 7}{4} \times \frac{1000}{38} \times 2 = 2024(\text{mm}^2)$$

3. 设计计算结果

经试算，满足设计准则要求的最小钢丝面积：

采用 6mm 钢丝 2 层缠绕时，满足条件的钢丝面积为 3147mm^2。

采用 7mm 钢丝 2 层缠绕时，满足条件的钢丝面积为 3091mm^2。

选取钢筋量最少的最优配筋结果，即采用 7mm 钢丝 2 层缠绕，钢丝面积 3091mm²，钢丝间距 24.901mm。

4. 检验

(1) 参数计算。

1) 基本参数：

混凝土面积 $A_c=1000(h_c-d_y)=1000\times(230.000-1.500)=228500.000(\text{mm}^2)$

钢筒面积 $A_y=1000d_y=1000\times1.500=1500.000(\text{mm}^2)$

钢丝面积 $A_s=3091.000\text{mm}^2$

2) 钢丝参数：

预应力钢丝总拉力：

$$f_{sg}=0.75f_{su}=0.75\times1570.000=1177.500(\text{MPa})$$

预应力钢丝抗拉屈服强度设计值：

$$f_{sy}=0.85f_{su}=0.85\times1570.000=1334.500(\text{MPa})$$

因 $$\lambda_{sj}=\frac{(2j-1)d_s+2(j-1)d_w}{2h_c}\quad j=1,2$$

故 $$\lambda_{s1}=0.0152,\ \lambda_{s2}=0.076$$

$$\lambda_s=\lambda_{s2}=0.076$$

对应于 f_{sg} 预应力钢丝的应变：

$$\varepsilon_{sg}=\frac{f_{sg}}{E_s}=\frac{1177.500}{193050.000}=0.006$$

对应于 f_{sy} 预应力钢丝的应变：

$$\varepsilon_{sy}=\frac{f_{sy}}{E_s}=\frac{1334.500}{193050.000}=0.007$$

3) 钢筒参数：

包括钢丝在内的保护层厚度：

$$h_m=20+7\times3=41(\text{mm}),\ \lambda_m=\frac{h_m}{2h_c}=\frac{41}{2\times230}=0.089$$

管芯混凝土内层厚度：

$$h_{ci}=\frac{D_y-D_i}{2}-d_y=\frac{3763.000-3600.000}{2}-1.500=80.000(\text{mm})$$

管芯混凝土外层厚度：

$$h_{co}=h_c-\frac{D_y-D_i}{2}=230.000-\frac{3763.000-3600.000}{2}=148.500(\text{mm})$$

薄钢筒中部至管芯内表面之间的距离：

$$d_{yi}=\frac{D_y-D_i}{2}-\frac{d_y}{2}=\frac{3763.000-3600.000}{2}-\frac{1.500}{2}=80.750(\text{mm})$$

$$\lambda_y=\frac{d_{yi}}{h_c}=\frac{80.750}{230.000}=0.351$$

$$E_y=206850.000\text{MPa}$$

$$f_{yy}=227.500\text{MPa}$$

4）混凝土应变：

预应力钢丝与管芯混凝土基于弹性模量设计值求得的弹性模量比：

$$n=E_s/E_c=193050.000/28597.396=6.751$$

薄钢筒与管芯混凝土基于弹性模量设计值求得的弹性模量比：

$$n'=E_y/E_c=206850.000/28597.396=7.233$$

管芯混凝土抗拉强度 f'_t 相对应的弹性拉应变：

$$\varepsilon'_t=f'_t/E_c=4.028/28597.396=0.000141$$

管芯混凝土出现初裂时的极限拉应变：

$$\varepsilon'_k=11\varepsilon'_t=11\times0.000141=0.001549$$

5）砂浆应变：

保护层砂浆与管芯混凝土弹性模量比：

$$m=E_m/E_c=25349.8/28597.396=0.8864$$

砂浆抗拉强度 f'_{tm} 相对应的弹性拉应变：

$$\varepsilon'_{tm}=f'_{tm}/E_m=3.603/25349.8=0.000142$$

初裂时保护层砂浆的极限拉应变：

$$\varepsilon'_{km}=8\varepsilon'_{tm}=8\times0.000142=0.001136$$

（2）荷载计算。

1）结构自重计算：

①混凝土重量：

$W_c=\pi(D_i+h_c)h_c\gamma_c$

$=3.14\times(3600.000+230.000)\times230.000\times24.000/1000000$

$=66.386(\text{kN/m})$

②砂浆保护层重量：

$W_m=\pi(D_i+2h_c+h_m)h_m\gamma_m$

$=3.14\times(3600.000+2\times230.000+41.000)\times41.000\times23.500/1000000$

$=12.406(\text{kN/m})$

③钢筒重量：

$W_y=\pi(D_y-t_y)t_y(\gamma_s-\gamma_c)$

$=3.14\times(3763.000-1.500)\times1.500\times(78.500-24.000)/1000000$

$=0.967(\text{kN/m})$

④钢丝重量：

$W_s=\pi[(D_i+2h_c+d_s)A_{s1}(\gamma_s-\gamma_m)+(D_i+2h_c+5d_s)A_{s2}(\gamma_s-\gamma_m)]$

$=2.179(\text{kN/m})$

⑤流体重量：

$$G_{wk}=\frac{\pi D_i^2\gamma_i}{4\times1000000}$$

$$=\frac{3.141593\times3600.000\times3600.000\times10.000}{4\times1000000}$$

$=101.788(\text{kN/m})$

⑥管道结构重量：

$G_{1k}=W_c+W_m+W_y+W_s$

$=66.386+12.406+0.967+2.179$

$=81.938(\text{kN/m})$

2）外荷载计算：

管顶竖向土压力 $W_e=332.330\text{kN/m}$；

车辆荷载 $q=3.018\text{kN/m}$；

施工荷载 $W_t=0.000\text{kN/m}$；

车辆荷载 q 大于施工荷载 W_t，按车辆荷载计算。

3）徐变收缩松弛计算：

依据附录D徐变和收缩参数：

野外放置时间 $t_1=270\text{d}$；

注水前放置时间 $t_2=1080\text{d}$；

相对湿度 $RH=70\%$。

按式（D.0.2-1）～式（D.0.2-4）计算得：

钢筒内侧混凝土在体表比修正系数等于1.0时的徐变系数 $\phi_1=1.775$；

钢筒外侧混凝土在体表比修正系数等于1.0时的徐变系数 $\phi_2=1.789$；

钢筒内侧混凝土在体表比修正系数等于1.0时的收缩应变 $s_1=0.000191$；

钢筒外侧混凝土在体表比修正系数等于1.0时的收缩应变 $s_2=0.000299$；

①徐变：

$$\gamma(h_{ci})=\frac{2(1+1.13e^{-0.0213h_{ci}})}{3}$$

$$=\frac{2\times(1+1.13e^{-0.0213\times80.000})}{3}=0.804$$

钢筒内侧混凝土的徐变系数：

$$\phi_{ci}=\phi_1\gamma(h_{ci})=1.775\times0.804=1.428$$

$$\gamma(h_{com})=\frac{2[1+1.13e^{-0.0213(h_{co}+h_m)}]}{3}$$

$$=\frac{2\times[1+1.13e^{-0.0213\times(148.500+41.000)}]}{3}=0.680$$

钢筒外侧混凝土和保护层的徐变系数：

$$\phi_{com}=\phi_2\gamma(h_{com})=1.789\times0.680=1.217$$

$$\gamma(h_m)=\frac{2(1+1.13e^{-0.0213h_m})}{3}$$

$$=\frac{2\times(1+1.13e^{-0.0213\times41.000})}{3}=0.982$$

保护层的徐变系数：

$$\phi_m = \phi_2 \gamma(h_m) = 1.789 \times 0.982 = 1.756$$

$$\phi = \frac{(h_{co}+h_m)\phi_{com} - h_m\phi_m + h_{ci}\phi_{ci}}{h_{ci}+h_{co}}$$

$$= \frac{(148.500+41.000)\times 1.217 - 41.000\times 1.756 + 80.000\times 1.428}{80.000+148.500}$$

$$= 1.194$$

②收缩：

$$\gamma(h_{ci}) = 1.2e^{-0.00472h_{ci}} = 1.2e^{-0.00472\times 80.000} = 0.822$$

内衬混凝土的收缩应变：

$$s_{ci} = s_1\gamma(h_{ci}) = 0.000191 \times 0.822 = 0.000157$$

$$\gamma(h_{com}) = 1.2e^{-0.00472(h_{co}+h_m)} = 1.2e^{-0.00472\times(148.500+41.000)} = 0.490$$

外层混凝土和保护层的收缩应变：

$$s_{com} = s_2\gamma(h_{com}) = 0.000299 \times 0.490 = 0.000146$$

$$\gamma(h_m) = 1.2e^{-0.00472h_m} = 1.2e^{-0.00472\times 41.000} = 0.989$$

保护层的收缩应变：

$$s_m = s_2\gamma(h_m) = 0.000299 \times 0.989 = 0.000295$$

$$s = \frac{(h_{co}+h_m)s_{com} - h_m s_m + h_{ci}s_{ci}}{h_{ci}+h_{co}}$$

$$= \frac{(148.500+41.000)\times 0.000146 - 41.000\times 0.000295 + 80.000\times 0.000157}{80.000+148.500}$$

$$= 0.000123$$

③松弛：钢丝符合 GB/T 5223 标准情况：

管芯混凝土弹性模量比计算：

$$n_i = 109(145f_c)^{-0.3} = 109\times(145\times 48.000)^{-0.3} = 7.667$$

$$n_i' = 117(145f_c)^{-0.3} = 117\times(145\times 48.000)^{-0.3} = 8.230$$

$$n_r = 93(145f_c)^{-0.3} = 93\times(145\times 48.000)^{-0.3} = 6.542$$

$$n_r' = 99(145f_c)^{-0.3} = 99\times(145\times 48.000)^{-0.3} = 6.964$$

第 1 层预应力钢丝松弛系数：

$$R_1 = 0.113 - 5.8\left[0.64\frac{A_{s1}}{A_c} + 0.36\left(\frac{A_s}{A_c} - \frac{A_{s1}}{A_c}\right)\right]$$

$$= 0.113 - 5.8 \times \left[0.64 \times \frac{1545.500}{228500.000} + 0.36 \times \left(\frac{3091.000}{228500.000} - \frac{1545.500}{228500.000}\right)\right]$$

$$= 0.073771$$

第 2 层预应力钢丝松弛系数：

$$R_t = 0.127 - 5\left[0.17\left(\frac{A_s}{A_c} - \frac{A_{sf}}{A_c}\right) + 0.83\frac{A_{sf}}{A_c}\right]$$

$$= 0.127 - 5 \times \left[0.17 \times \left(\frac{3091.000}{228500.000} - \frac{1545.500}{228500.000}\right) + 0.83 \times \frac{1545.500}{228500.000}\right]$$

$$= 0.093182$$

$$R_2 = R_t = 0.093$$

4）预压应力计算。依据 6.3.4 条和附录 E 计算。

①初始预压应力：

缠绕第 1 层预应力钢丝后管芯混凝土初始预应力：

$$f_{ic1} = \frac{A_{s1} f_{sg}}{A_c + n_i A_{s1} + n_i' A_y}$$

$$= \frac{1545.500 \times 1177.500}{228500.000 + 7.667 \times 1545.500 + 8.230 \times 1500.000}$$

$$= 7.202(\text{MPa})$$

缠绕第 2 层预应力钢丝后管芯混凝土初始预应力：

$$f_{ic2} = \frac{A_{s2} f_{sg}}{A_c + n_i(A_{s1} + A_{s2}) + n_i' A_y}$$

$$= \frac{1545.500 \times 1177.500}{228500.000 + 7.667 \times (1545.500 + 1545.500) + 8.230 \times 1500.000}$$

$$= 6.879(\text{MPa})$$

$$f_{ic} = f_{ic1} + f_{ic2} = 7.202 + 6.879 = 14.081\ (\text{MPa})$$

第 1 层预应力钢丝初始应力：

$$f_{is1} = -f_{sg} + n_i(f_{ic1} + f_{ic2})$$

$$= -1177.500 + 7.667 \times (7.202 + 6.879)$$

$$= -1069.538\ (\text{MPa})$$

第 2 层预应力钢丝初始应力：

$$f_{is2}=-f_{sg}+n_i f_{ic2}$$
$$=-1177.500+7.667\times 6.879$$
$$=-1124.756(\text{MPa})$$

②薄钢筒初始预应力：

$$f_{iy}=n_i' f_{ic}=8.230\times 14.081=115.885(\text{MPa})$$

③最终预压应力：

管芯混凝土最终预应力：

$$f_{cr}=\frac{f_{ic}(A_c+n_r A_s+n_r' A_y)-(A_s E_s+A_y E_y)\varepsilon-A_s R f_{sg}}{A_c+(n_r A_s+n_r' A_y)(1+\phi)}$$
$$=10.933(\text{MPa})$$

薄钢筒最终预应力：

$$f_{yr}=210.323\text{MPa}$$

第 1 层预应力钢丝最终应力：

$$f_{sr1}=-894.080\text{MPa}$$

第 2 层预应力钢丝最终应力：

$$f_{sr2}=-926.441\text{MPa}$$

$$\varepsilon_{cr}=\frac{f_{cr}}{E_c}=\frac{10.933}{28597.396484}=0.000382$$

④抵御内压：

抵消管芯混凝土最终预应力的内水压力：

$$P_0=\frac{f_{cr}(A_c+n_r A_s+n_r' A_y)}{0.5D_y}$$
$$=\frac{10.933\times(228500.000+6.542\times 3091.000+6.964\times 1500.000)}{0.5\times 3763.000}$$
$$=1505.926(\text{MPa})$$
$$N_0=0.5D_y P_0$$
$$=0.5\times 3763.000\times 1505.926/1000=2833.400(\text{kN/m})$$

⑤最大内压：

最大极限内压：

$$P'_k=P_0\left(0.5\frac{\varepsilon'_{km}}{\varepsilon_{cr}},\ 1+0.41\frac{\sqrt{f'_c}}{f_{cr}}\right)_{min}$$

$$=1505.926\times\left(0.5\times\frac{0.001134}{0.000382},\ 1+0.41\times\frac{\sqrt{48.000}}{10.933}\right)_{min}$$

$$=1897.199(\text{MPa})$$

最大极限轴力：

$$N'_k=0.5D_yP'_k$$

$$=0.5\times3763.000\times1897.199/1000$$

$$=3569.579(\text{kN/m})$$

开裂内压：

$$P_b=2\frac{A_yf'_{yy}+A_sf_{su}}{D_y}$$

$$=2\times\frac{1500.000\times310.000+3091.000\times1570.000}{3763.000}$$

$$=2826.399(\text{MPa})$$

5）工作极限状态设计准则检验。

①整个圆管的工作性：

a. W1 荷载组合：

管道内压P=900.000MPa，抵御内压P_0=1505.926MPa

$P\leqslant P_0$　　检验合格

b. WT1 荷载组合：

抵御内压P_0=1505.926MPa，$1.4P_0$=2108.296MPa

最大内压P'_k=1897.199MPa

管道内压$P=P_w+\Delta H_r$=1260.000MPa，$[1.4P_0,\ P'_k]_{min}$=1897.199MPa

$P\leqslant[1.4P_0,\ P'_k]_{min}$　　检验合格

准则内容	荷载组合	P	极限值	是否符合准则要求
$P \leqslant P_0$	W1	900.000MPa	1505.926MPa	符合
$P < \min(P_k, 1.4P_0)$	WT1	1260.000MPa	1897.199MPa	符合

②管顶/管底的工作性：

a. W1 荷载组合：

管底轴力弯矩：由内压、外荷载（土荷载、瞬时荷载和施工荷载）和管道重量、流体重量均匀作用于管壁的弯矩和轴力为：

$$M_1 = \overline{R}[C_{m1e}(F_{sk}+q) + C_{m1p}G_{1k} + C_{m1f}G_{wk}]$$

$$N_1 = \frac{1}{2}D_y P - [C_{n1e}(F_{sk}+q) + C_{n1p}G_{1k} + C_{n1f}G_{wk}]$$

其中

$$\overline{R} = \frac{D_i + h_c + h_m}{2}$$

计算得：

$N_1 = 1604.254\text{kN/m}$，$M_1 = 138233.422\text{kN} \cdot \text{m/m}$

轴力作用线：

从管道内壁至内压和外荷载作用引起的组合荷载轴力 N 作用线之间的距离

$$e = h_c \frac{0.5bh_c + (n-m)A_s(1+\lambda_s) + (n'-1)A_y\lambda_y + mbh_m(1+\lambda_m)}{bh_c + (n-m)A_s + (n'-1)A_y + mbh_m}$$

从管道内壁至预压轴力 N_0 作用线之间的距离为：

$$e_0 = h_c \frac{0.5bh_c + nA_s(1+\lambda_s) + (n'-1)A_y\lambda_y}{bh_c + nA_s + (n'-1)A_y}$$

计算得：

$$e = 134.474\text{mm}, \quad e_0 = 124.394\text{mm}$$

经反复计算得到使轴力弯矩平衡时的值 v_2 和 k 为：

$$v_2 = 0.500, \quad k = 0.319$$

常数计算：$t_t = 48.975$，$t_s = 24.471$，$\lambda = 3.300$。

应力计算：$f_{ci} = 3.827\text{MPa}$，$f_{cy} = -0.601\text{MPa}$，$\Delta f_y = -4.345\text{MPa}$，$f_{co} = 12.876\text{MPa}$，$\Delta f_{s_1} = 88.861\text{MPa}$，$\Delta f_{s_2} = 96.634\text{MPa}$，$f_{ms_1} = 1.97\text{MPa}$，$f_{ms_2} = 2.987\text{MPa}$，$f_{mm} =$

3.205MPa，f_{mo}=4.693MPa。

内力总和：

应满足$\sum F=0$的条件，即

$$N_0-N_1=F_{ci}+F_y+F_{co}+F_s+F_m$$

依据附录E　极限状态计算方法

计算得：F_{ci}=−194.737kN

薄钢筒所受的轴力 F_y=5.617kN

外层混凝土所受的轴力 F_{co}=1007.860kN

预应力钢丝所受的轴力 F_s=279.022kN

砂浆保护层所受的轴力 F_m=131.388kN

$$F=N_0-N_1-(F_{ci}+F_y+F_{co}+F_s+F_m)=-0.005(\text{kN})$$

满足内力平衡条件

弯矩总和：

应满足$\sum M=0$条件，即

$M_1-N_0[(1+\lambda_s)h_c-e_0]+N_1[(1+\lambda_s)h_c-e]=M_{ci}+M_y+M_{co}+M_m+M_s$ 多层钢丝

依据附录E　极限状态计算方法

计算得：M_{ci}=42987.586kN·m

薄钢筒截面所受的弯矩 M_y=−936.558kN·m

外层混凝土截面所受的弯矩 M_{co}=−70232.430kN·m

砂浆保护层截面所受的弯矩 M_m=811.304kN·m

预应力钢丝截面所受的弯矩 M_s=−1880.064kN·m

$M=M_1-N_0[(1+\lambda_s)\ h_c-e_0]+N_1[(1+\lambda_s)\ h_c-e]-(M_{ci}+M_y+M_{co}+M_m+M_s)=-1.342$（kN·m）满足弯矩平衡要求。

计算此时的应变进行检验：

管芯混凝土内表面的应变 $\varepsilon_{ci}=(1+\upsilon_2)\varepsilon_t'$=0.000211

$1.5\varepsilon_t'$=0.000211

$\varepsilon_{ci}\leqslant 1.5\varepsilon_t'$　　检验合格

b. WT1 荷载组合：

管底轴力弯矩：

$N_1=2281.594\text{kN/m}$，$M_1=138233.422\text{kN}\cdot\text{m/m}$

轴力作用线：

$e=130.779\text{mm}$，$e_0=124.394\text{mm}$

经反复计算得到使轴力弯矩平衡时的值 v_2 和 k 为：

$v_2=3.246$，$k=0.580$

常数计算：

$t_c=31.405$，$t_s=101.933$，$\lambda=0.792$

应力计算：

$f_{ci}=2.721\text{MPa}$，$f_{cy}=3.756\text{MPa}$

$\Delta f_y=48.786\text{MPa}$，$f_{co}=12.398\text{MPa}$

$\Delta f_{s1}=86.722\text{MPa}$，$f_{ms1}=1.690\text{MPa}$

$\Delta f_{s2}=98.843\text{MPa}$，$f_{ms2}=3.276\text{MPa}$

$f_{mm}=3.616\text{MPa}$，$f_{mo}=5.937\text{MPa}$

内力总和：

$F_{ci}=-407.192\text{kN}$，$F_y=-67.545\text{kN}$

$F_{co}=599.190\text{kN}$，$F_s=279.116\text{kN}$，$F_m=148.237\text{kN}$

$F=N_0-N_1-(F_{ci}+F_y+F_{co}+F_s+F_m)=0.000$

弯矩总和：

$M_{ci}=75009.313\text{kN}\cdot\text{m}$，$M_y=11263.118\text{kN}\cdot\text{m}$

$M_{co}=-29792.121\text{kN}\cdot\text{m}$，$M_m=1095.231\text{kN}\cdot\text{m}$

$M_s=-1839.833\text{kN}\cdot\text{m}$

$M=M_1-N_0[(1+\lambda_s)h_c-e_0]+N_1[(1+\lambda_s)h_c-e]-(M_{ci}+M_y+M_{co}+M_m+M_s)=-0.182\ (\text{kN}\cdot\text{m})$

检验：

$\varepsilon_{ci}=0.000598$，$\varepsilon'_k=0.001549$

$\varepsilon'_{ci}\leqslant\varepsilon'_k$　　检验合格

c. WT2 荷载组合：

管底轴力弯矩：

$N_1=1603.272\text{kN/m}$，$M_1=138961.844\text{kN}\cdot\text{m/m}$

轴力作用线：

$e=134.481\text{mm}$，$e_0=124.394\text{mm}$

经反复计算得到使轴力弯矩平衡时的值 v_2 和 k 为：

$v_2=0.518$，$k=0.321$

常数计算：

$t_t=48.668$，$t_s=25.221$，$\lambda=3.202$

应力计算：

$f_{ci}=3.819\text{MPa}$，$f_{cy}=-0.568\text{MPa}$

$\Delta f_y=-4.107\text{MPa}$，$f_{co}=12.920\text{MPa}$

$\Delta f_{s1}=89.174\text{MPa}$，$f_{ms1}=2.011\text{MPa}$

$\Delta f_{s2}=96.995\text{MPa}$，$f_{ms2}=3.034\text{MPa}$

$f_{mm}=3.253\text{MPa}$，$f_{mo}=4.752\text{MPa}$

内力总和：

$F_{ci}=-196.973\text{kN}$，$F_{cy}=5.308\text{kN}$

$F_{co}=1008.474\text{kN}$，$F_s=279.927\text{kN}$，$F_m=133.384\text{kN}$

$F=N_0-N_1-(F_{ci}+F_y+F_{co}+F_s+F_m)=0.008\ (\text{kN})$

弯矩总和：

$M_{ci}=43429.613\text{kN}\cdot\text{m}$，$M_y=-885.188\text{kN}\cdot\text{m}$

$M_{co}=-70125.984\text{kN}\cdot\text{m}$，$M_m=819.921\text{kN}\cdot\text{m}$

$M_s=-1885.941\text{kN}\cdot\text{m}$

$$M=M_1-N_0[(1+\lambda_s)h_c-e_0]+N_1[(1+\lambda_s)h_c-e]-(M_{ci}+M_y+M_{co}+M_m+M_s)=1.227\ (\text{kN}\cdot\text{m})$$

检验：

$\varepsilon_{ci}=0.000214$，$\varepsilon'_k=0.001549$

$\varepsilon_{ci}\leqslant\varepsilon'_k$　检验合格

d. FT1 荷载组合：

管底轴力弯矩：

$N_1=2137.217\text{kN/m}$，$M_1=152056.781\text{kN}\cdot\text{m/m}$

轴力作用线：

$e=131.370\text{mm}$，$e_0=124.394\text{mm}$

经反复计算得到使轴力弯矩平衡时的值 v_2 和 k 为：

$v_2=3.557$，$k=0.574$

常数计算：

$t_t=28.994$，$t_s=103.127$，$\lambda=0.783$

应力计算：

$f_{ci}=2.595\text{MPa}$，$f_{cy}=3.717\text{MPa}$

$\Delta f_y=51.620\text{MPa}$，$f_{co}=13.597\text{MPa}$

$\Delta f_{s1}=95.073\text{MPa}$，$f_{ms1}=2.782\text{MPa}$

$\Delta f_{s2}=108.202\text{MPa}$，$f_{ms2}=4.500\text{MPa}$

$f_{mm}=4.868\text{MPa}$，$f_{mo}=7.383\text{MPa}$

内力总和：

$F_{ci}=-399.906\text{kN}$，$F_{cy}=-71.854\text{kN}$

$F_{co}=665.446\text{kN}$，$F_s=302.906\text{kN}$，$F_m=199.590\text{kN}$

$F=N_0-N_1-(F_{ci}+F_y+F_{co}+F_s+F_m)=0.001\ (\text{kN})$

弯矩总和：

$M_{ci}=73511.250\text{kN}\cdot\text{m}$，$M_y=11981.617\text{kN}\cdot\text{m}$

$M_{co}=-33356.320\text{kN}\cdot\text{m}$，$M_m=1303.374\text{kN}\cdot\text{m}$

$M_s=-1996.884\text{kN}\cdot\text{m}$

$$M=M_1-N_0[(1+\lambda_s)h_c-e_0]+N_1[(1+\lambda_s)h_c-e]-(M_{ci}+M_y+M_{co}+M_m+M_s)=0.514\ (\text{kN}\cdot\text{m})$$

检验：

$\varepsilon_{ci}=0.000642$，$\varepsilon'_k=0.001549$

$\varepsilon_{ci}\leqslant\varepsilon'_k$　　检验合格

准则内容	荷载组合	v_2	k	计算值	极限值	是否符合准则要求
管芯极限拉应变 $\varepsilon_{ci} \leqslant 1.5\varepsilon'_t$	W1	0.500	0.319	0.000211	0.000211	符合
管芯极限拉应变 $\varepsilon_{ci} \leqslant \varepsilon'_k = 11\varepsilon'_t$	WT1	3.246	0.580	0.000598	0.001549	符合
	WT2	0.518	0.321	0.000214	0.001549	符合
	FT1	3.557	0.574	0.000642	0.001549	符合

e. FW1 荷载组合：

管底轴力弯矩：

$N_1 = -116.139\text{kN/m}$，$M_1 = 158285.953\text{kN} \cdot \text{m/m}$

轴力作用线：

$e = 138.797\text{mm}$，$e_0 = 124..394\text{mm}$

经反复计算得到使轴力弯矩平衡时的值 v_2 和 k 为：

$v_2 = -0.782$，$k = 0.043$

依据附录 E　极限状态计算方法

常数计算：

$t_t = 45.812$，$t_s = -35.846$，$\lambda = -2.253$

应力计算：

$f_{ci} = 0.876\text{MPa}$，$f_{cy} = -6.224\text{MPa}$

$\Delta f_y = -45.016\text{MPa}$，$f_{co} = 19.346\text{MPa}$

$\Delta f_{s1} = 132.675\text{MPa}$，$f_{ms1} = 7.702\text{MPa}$

$\Delta f_{s2} = 140.984\text{MPa}$，$f_{ms2} = 8.789\text{MPa}$

$f_{mm} = 9.021\text{MPa}$，$f_{mo} = 10.613\text{MPa}$

内力总和：

$F_{ci} = -4.366\text{kN}$，$F_{cy} = 58.189\text{kN}$

$F_{co} = 2128.392\text{kN}$，$F_s = 397.455\text{kN}$，$F_m = 369.880\text{kN}$

$F = N_0 - N_1 - (F_{ci} + F_y + F_{co} + F_s + F_m) = -0.010\ (\text{kN})$

弯矩总和：

$M_{ci} = 1066.133\text{kN} \cdot \text{m}$，$M_y = -9702.948\text{kN} \cdot \text{m}$

$M_{co}=-193353.094\text{kN}\cdot\text{m}$，$M_m=1555.584\text{kN}\cdot\text{m}$

$M_s=-2704.049\text{kN}\cdot\text{m}$

$M=M_1-N_0[(1+\lambda_s)h_c-e_0]+N_1[(1+\lambda_s)h_c-e]-(M_{ci}+M_y+M_{co}+M_m+M_s)=-8.179$（kN·m）

检验：

$\sigma_r=-0.114\text{MPa}\leqslant 0.082\text{MPa}$　　检验合格

f. WT3 荷载组合：

依据附录 E　极限状态计算方法

管底轴力弯矩：

$N_1=-90.078\text{kN/m}$，$M_1=138961.844\text{kN}\cdot\text{m/m}$

轴力作用线：

$e=138.797\text{mm}$，$e_0=124.394\text{mm}$

经反复计算得到使轴力弯矩平衡时的值 v_2 和 k 为：

$v_2=-1.125$，$k=-0.028$

常数计算：

$t_t=52.109$，$t_s=-58.646$，$\lambda=-1.377$

应力计算：

$f_{ci}=-0.505\text{MPa}$，$f_{cy}=-6.747\text{MPa}$

$\Delta f_y=-48.802\text{MPa}$，$f_{co}=18.284\text{MPa}$

$\Delta f_{s1}=125.252\text{MPa}$，$f_{ms1}=6.730\text{MPa}$

$\Delta f_{s2}=132.557\text{MPa}$，$f_{ms2}=7.686\text{MPa}$

$f_{mm}=7.891\text{MPa}$，$f_{mo}=9.290\text{MPa}$

内力总和：

$F_{ci}=-1.651\text{kN}$，$F_{cy}=63.083\text{kN}$

$F_{co}=2162.367\text{kN}$，$F_s=376.163\text{kN}$，$F_m=323.525\text{kN}$

$F=N_0-N_1-(F_{ci}+F_y+F_{co}+F_s+F_m)=-0.009$（kN）

弯矩总和：

$M_{ci}=412.305\text{kN}\cdot\text{m}$，$M_y=-10519.058\text{kN}\cdot\text{m}$

$M_{co}=-208334.438\text{kN}\cdot\text{m}$，$M_m=1362.626\text{kN}\cdot\text{m}$

$M_s=-2564.445\text{kN}\cdot\text{m}$

$$M=M_1-N_0\ [\ (1+\lambda_s)h_c-e_0\ ]\ +N_1\ [(1+\lambda_s)h_c-e\ ]-$$
$$(M_{ci}+M_y+M_{co}+M_m)\ =5.271\ (\text{kN}\cdot\text{m})$$

检验：

$\sigma_r=-0.154\text{MPa}\leqslant 0.082\text{MPa}$，检验合格

准则内容	荷载组合	v_2	k	计算值	极限值	是否符合准则要求
径向极限张力	FW1	−0.782	0.043	−0.114MPa	0.082MPa	符合
$\sigma_r\leqslant 0.082\text{MPa}$	WT3	−1.125	−0.028	−0.154MPa	0.082MPa	符合

③管侧的工作性，依据附录 E，极限状态计算方法。

a. W1 荷载组合：

管侧轴力弯矩：

$$M_2=R\ [C_{m2e}(F_{sk}+q)\ +C_{m2p}G_{lk}+C_{m2f}G_{wk}]$$

$$N_2=\frac{1}{2}D_yP-\ [C_{n2e}(F_{sk}+q)\ +C_{n2p}G_{lk}+C_{n2f}G_{wk}]$$

计算得：$N_2=1495.831\text{kN/m}$，$M_2=90343.438\text{kN}\cdot\text{m/m}$

轴力作用线：

$e=135.376\text{mm}$，$e_0=124.394\text{mm}$

经反复计算得到使轴力弯矩平衡时的值 v_2 和 k' 为：

$v_2=-0.537$，$k'=0.122$

常数计算：

$$t_t=\frac{k'h_c}{1+v_2}=60.706,\ t_s=v_2t_t=-32.575,\ \lambda=\frac{h_c-d_{yi}}{t_s}=$$

-4.582

应力计算：

$f_{ci}=13.394\text{MPa}$，$f_{cy}=8.036\text{MPa}$，$\Delta f_y=58.128\text{MPa}$，$f_{co}=1.867\text{MPa}$，$\Delta f_s=20.439\text{MPa}$

内力总和：

内力应满足条件$\Sigma F=0$，即 $N_0-N_2=F_{ci}+F_y+F_{co}+F_s$

内层混凝土所受的轴力 $F_{ci}=1351.927\text{kN}$

薄钢筒所受的轴力 $F_y=75.138\text{kN}$

外层混凝土所受的轴力 $F_{co}=-26.254\text{kN}$

预应力钢丝所受的轴力 $F_s=-63.176\text{kN}$

$$F=N_0-N_2-(F_{ci}+F_y+F_{co}+F_s)=-0.066\ (\text{kN})$$

内力平衡条件满足

弯矩总和：

弯矩应满足条件$\sum M=0$，即

$M_2+N_0[(1+\lambda_s)h_c-e_0]-N_2[(1+\lambda_s)h_c-e]=M_{ci}+M_y+M_{co}+M_s$ 多层钢丝

内层混凝土截面所受的弯矩 $M_{ci}=243631.328\text{kN}\cdot\text{m}$

薄钢筒截面所受的弯矩 $M_y=12529.188\text{kN}\cdot\text{m}$

外层混凝土截面所受的弯矩 $M_{co}=-705.630\text{kN}\cdot\text{m}$

对于工作荷载准则，取 $e=e_0$

预应力钢丝截面所受的弯矩 $M_s=\sum_{j=1}^{f-1}F_{sj}h_c(\lambda_{sf}-\lambda_{sj})=-442.230\ (\text{kN}\cdot\text{m})$多层钢丝

$$M=M_2+N_0[(1+\lambda_s)h_c-e_0]+N_2[(1+\lambda_s)h_c-e]-(M_{ci}+M_y+M_{co}+M_m+M_s)=-6.812(\text{kN}\cdot\text{m})$$

弯矩平衡条件满足

检验：

$\varepsilon_{co}=0.000065$，$1.5\varepsilon_t'=0.000211$

$\varepsilon_{ci}\leqslant 1.5\varepsilon_t'$　　检验合格

b. WT1 荷载组合：

管侧轴力弯矩：

$N_2=2173.171\text{kN/m}$，$M_2=90343.438\ (\text{kN}\cdot\text{m})/\text{m}$

轴力作用线：

$e=131.216\text{mm}$，$e_0=124.394\text{mm}$

经反复计算得到使轴力弯矩平衡时的值 v_2 和 k'为：

$v_2=0.123$，$k'=0.294$

常数计算：

$t_t=60.309$，$t_s=7.424$，$\lambda=20.104$

应力计算：

$f_{ci}=10.838\text{MPa}$，$f_{cy}=5.444\text{MPa}$

$\Delta f_y=39.380\text{MPa}$，$f_{co}=3.978\text{MPa}$，$\Delta f_s=38.428\text{MPa}$

内力总和：

$F_{ci}=879.288\text{kN}$，$F_{cy}=50.904\text{kN}$

$F_{co}=-151.178\text{kN}$，$F_s=-118.781\text{kN}$

$F=N_0-N_2-(F_{ci}+F_y+F_{co}+F_s)=-0.004\ (\text{kN})$

弯矩总和：

$M_{ci}=170063.844\text{kN}\cdot\text{m}$，$M_y=8488.196\text{kN}\cdot\text{m}$，$M_{co}=-6099.552\text{kN}\cdot\text{m}$

对于工作荷载准则，取 $e=e_0$

$M_s=-831.468\text{kN}\cdot\text{m}$

$M=M_2+N_0[(1+\lambda_s)h_c-e_0]+N_2[(1+\lambda_s)h_c-e]-(M_{ci}+M_y+M_{co}+M_m+M_s)=0.374\ (\text{kN}\cdot\text{m})$

检验：

$\varepsilon_{co}=0.000158$，$\varepsilon'_k=0.001549$

$\varepsilon_{ci}\leqslant\varepsilon'_k$　　检验合格

c. WT2 荷载组合：

管侧轴力弯矩：

$N_2=1494.206\text{kN/m}$，$M_2=90860.398\ (\text{kN}\cdot\text{m})/\text{m}$

轴力作用线：

$e=135.390\text{mm}$，$e_0=124.394\text{mm}$

经反复计算得到使轴力弯矩平衡时的值 v_2 和 k' 为：

$v_2=-0.528$，$k'=0.124$

常数计算：

$t_t=60.362$，$t_s=-31.883$，$\lambda=-4.681$

应力计算：

$f_{ci}=13.447\text{MPa}$，$f_{cy}=8.059\text{MPa}$

Δf_y=58.292MPa，f_{co}=1.900MPa，Δf_s=20.712MPa

内力总和：

F_{ci}=1354.973kN，F_{cy}=75.350kN

F_{co}=−27.060kN，F_s=−64.020kN

$F=N_0-N_2-(F_{ci}+F_y+F_{co}+F_s)$ =−0.049 (kN)

弯矩总和：

M_{ci}=244337.109kN·m，M_y=12564.606kN·m，M_{co}=−730.423kN·m

对于工作荷载准则，取 $e=e_0$

M_s=−448.141kN·m

$M=M_2+N_0[(1+\lambda_s)h_c-e_0]+N_2[(1+\lambda_s)h_c-e]$
$-(M_{ci}+M_y+M_{co}+M_m+M_s)$ =−0.245 (kN·m)

检验：

ε_{co}=0.000066，ε'_k=0.001549

$\varepsilon_{ci}\leqslant\varepsilon'_k$　　检验合格

d. FT1 荷载组合：

管侧轴力弯矩：

N_2=2017.951kN/m，M_2=99377.789 (kN·m)/m

轴力作用线：

e=131.922mm，e_0=124.394mm

经反复计算得到使轴力弯矩平衡时的值 v_2 和 k'为：

v_2=0.151，k'=0.274

常数计算：

t_t=54.826，t_s=8.268，λ=18.052

应力计算：

f_{ci}=12.262MPa，f_{cy}=6.330MPa

Δf_y=45.784MPa，f_{co}=3.967MPa，Δf_s=39.970MPa

内力总和：

F_{ci}=1023.315kN，F_{cy}=59.181kN

F_{co}=−143.467kN，F_s=−123.548kN

$F=N_0-N_2-(F_{ci}+F_y+F_{co}+F_s)=-0.032$（kN）

弯矩总和：

$M_{ci}=196337.906$kN·m，$M_y=9868.418$kN·m，$M_{co}=-5578.444$kN·m

对于工作荷载准则，取 $e=e_0$

$M_s=-864.837$kN·m

$M=M_2+N_0[(1+\lambda_s)h_c-e_0]+N_2[(1+\lambda_s)h_c-e]-(M_{ci}+M_y+M_{co}+M_m+M_s)=1.164$（kN·m）

检验：

$\varepsilon_{co}=0.000162$，$\varepsilon'_k=0.001549$

$\varepsilon_{ci}\leqslant\varepsilon'_k$　　检验合格

准则内容	荷载组合	v_2	k	计算值	极限值	是否符合准则要求
管芯极限拉应变 $\varepsilon_{co}\leqslant 1.5\varepsilon'_t$	W1	−0.537	0.122	0.000065	0.000211	符合
管芯极限拉应变 $\varepsilon_{co}\leqslant\varepsilon'_k=11\varepsilon'_t$	WT1	0.123	0.294	0.000158	0.001549	符合
	WT2	−0.528	0.124	0.000066	0.001549	符合
	FT1	0.151	0.274	0.000162	0.001549	符合

e. W1 荷载组合：

管侧轴力弯矩：

$N_2=1495.831$kN/m，$M_2=90343.438$（kN·m）/m

轴力作用线：

$e=135.376$mm，$e_0=124.394$mm

经反复计算得到使轴力弯矩平衡时的值 v_2 和 k' 为：

$v_2=-0.537$，$k'=0.122$

常数计算：

$t_t=60.706$，$t_s=-32.575$，$\lambda=-4.582$

应力计算：

$f_{ci}=13.394$MPa，$f_{cy}=8.036$MPa

$\Delta f_y=58.128\text{MPa}$，$f_{co}=1.867\text{MPa}$，$\Delta f_s=20.439\text{MPa}$

内力总和：

$F_{ci}=1351.927\text{kN}$，$F_{cy}=75.138\text{kN}$

$F_{co}=-26.254\text{kN}$，$F_s=-63.176\text{kN}$

$F=N_0-N_2-(F_{ci}+F_y+F_{co}+F_s)=-0.066\ (\text{kN})$

弯矩总和：

$M_{ci}=243631.328\text{kN}\cdot\text{m}$，$M_y=12529.188\text{kN}\cdot\text{m}$，$M_{co}=-705.630\text{kN}\cdot\text{m}$

对于工作荷载准则，取 $e=e_0$

$M_s=-442.230\text{kN}\cdot\text{m}$

$M=M_2+N_0[(1+\lambda_s)h_c-e_0]+N_2[(1+\lambda_s)h_c-e]-(M_{ci}+M_y+M_{co}+M_m+M_s)=-6.812\ (\text{kN}\cdot\text{m})$

检验：

$\varepsilon_{mo}=0.000543$，$6.4\varepsilon'_{tm}=0.000907$

$\varepsilon_{mo}\leqslant 6.4\varepsilon'_{km}$　　检验合格

f. WT1 荷载组合：

管侧轴力弯矩：

$N_2=2173.171\text{kN/m}$，$M_2=90343.438\ (\text{kN}\cdot\text{m})/\text{m}$

轴力作用线：

$e=131.216\text{mm}$，$e_0=124.394\text{mm}$

经反复计算得到使轴力弯矩平衡时的值 v_2 和 k' 为：

$v_2=0.123$，$k'=0.294$

常数计算：

$t_t=60.309$，$t_s=7.424$，$\lambda=20.104$

应力计算：

$f_{ci}=10.838\text{MPa}$，$f_{cy}=5.444\text{MPa}$

$\Delta f_y=39.380\text{MPa}$，$f_{co}=3.978\text{MPa}$，$\Delta f_s=38.428\text{MPa}$

内力总和：

$F_{ci}=879.288\text{kN}$，$F_{cy}=50.904\text{kN}$

$F_{co}=-151.178\text{kN}$，$F_s=-118.781\text{kN}$

$F=N_0-N_2-(F_{ci}+F_y+F_{co}+F_s)=-0.004$ (kN)

弯矩总和：

$M_{ci}=170063.844$kN·m，$M_y=8488.196$kN·m，$M_{co}=-6099.552$kN·m

对于工作荷载准则，取 $e=e_0$

$M_s=-831.468$kN·m

$M=M_2+N_0[(1+\lambda_s)h_c-e_0]+N_2[(1+\lambda_s)h_c-e]-(M_{ci}+M_y+M_{co}+M_m+M_s)=0.374$ (kN·m)

检验：

$\varepsilon_{mo}=0.000636$，$8\varepsilon'_{tm}=0.001134$

$\varepsilon_{mo}\leqslant 8\varepsilon'_{km}$　　检验合格

g. WT2 荷载组合：

管侧轴力弯矩：

$N_2=1494.206$kN/m，$M_2=90860.398$ (kN·m)/m

轴力作用线：

$e=135.390$mm，$e_0=124.394$mm

经反复计算得到使轴力弯矩平衡时的值 v_2 和 k'为：

$v_2=-0.528$，$k'=0.124$

常数计算：

$t_1=60.362$，$t_s=-31.883$，$\lambda=-4.681$

应力计算：

$f_{ci}=13.447$MPa，$f_{cy}=8.059$MPa

$\Delta f_y=58.292$MPa，$f_{co}=1.900$MPa，$\Delta f_s=20.712$MPa

内力总和：

$F_{ci}=1354.973$kN，$F_{cy}=75.350$kN

$F_{co}=-27.060$kN，$F_s=-64.020$kN

$F=N_0-N_2-(F_{ci}+F_y+F_{co}+F_s)=-0.049$ (kN)

弯矩总和：

$M_{ci}=244337.109$kN·m，$M_y=12564.606$kN·m，$M_{co}=$

$-730.423\text{kN}\cdot\text{m}$

对于工作荷载准则，取 $e=e_0$

$M_s=-448.141\text{kN}\cdot\text{m}$

$M=M_2+N_0\left[(1+\lambda_s)h_c-e_0\right]+N_2\left[(1+\lambda_s)h_c-e\right]$

$-(M_{ci}+M_y+M_{co}+M_m+M_s)=-0.245\ (\text{kN}\cdot\text{m})$

检验：

$\varepsilon_{mo}=0.000544$，$8\varepsilon'_{tm}=0.001134$

$\varepsilon_{mo}\leqslant 8\varepsilon'_{km}$　　检验合格

h. FT1 荷载组合：

管侧轴力弯矩：

$N_2=2017.951\text{kN/m}$，$M_2=99377.789\ (\text{kN}\cdot\text{m})/\text{m}$

轴力作用线：

$e=131.922\text{mm}$，$e_0=124.394\text{mm}$

经反复计算得到使轴力弯矩平衡时的值 v_2 和 k' 为：

$v_2=0.151$，$k'=0.274$

常数计算：

$t_t=54.826$，$t_s=8.268$，$\lambda=18.052$

应力计算：

$f_{ci}=12.262\text{MPa}$，$f_{cy}=6.330\text{MPa}$

$\Delta f_y=45.784\text{MPa}$，$f_{co}=3.967\text{MPa}$，$\Delta f_s=39.970\text{MPa}$

内力总和：

$F_{ci}=1023.315\text{kN}$，$F_{cy}=59.181\text{kN}$

$F_{co}=-143.467\text{kN}$，$F_s=-123.548\text{kN}$

$F=N_0-N_2-(F_{ci}+F_y+F_{co}+F_s)=-0.032\ (\text{kN})$

弯矩总和：

$M_{ci}=196337.906\text{kN}\cdot\text{m}$，$M_y=9868.418\text{kN}\cdot\text{m}$，$M_{co}=-5578.444\text{kN}\cdot\text{m}$

对于工作荷载准则，取 $e=e_0$

$M_s=-864.837\text{kN}\cdot\text{m}$

$M=M_2+N_0\left[(1+\lambda_s)h_c-e_0\right]+N_2\left[(1+\lambda_s)h_c-e\right]-(M_{ci}+M_y+M_{co}+M_m+M_s)=1.164\ (\text{kN}\cdot\text{m})$

检验：

$\varepsilon_{mo}=0.000650$，$\varepsilon'_{tm}=0.001134$

$\varepsilon_{mo}\leqslant 8\varepsilon'_{km}$　　检验合格

准则内容	荷载组合	v_2	k	计算值	极限值	是否符合准则要求
管芯极限拉应变 $\varepsilon_{mo}\leqslant 0.8\varepsilon'_{km}=6.4\varepsilon'_{tm}$	W1	−0.537	0.122	0.000543	0.000907	符合
管芯极限拉应变 $\varepsilon_{mo}\leqslant\varepsilon'_{km}=8\varepsilon'_{tm}$	WT1	0.123	0.294	0.000636	0.001134	符合
	WT2	−0.528	0.124	0.000544	0.001134	符合
	FT1	0.151	0.274	0.000650	0.001134	符合

i. W2 荷载组合：

管侧轴力弯矩：

$N_2=-197.519\text{kN/m}$，$M_2=90343.438\ (\text{kN}\cdot\text{m})/\text{m}$

轴力作用线：

$e=138.797\text{mm}$，$e_0=124.394\text{mm}$

经反复计算得到使轴力弯矩平衡时的值 v_2 和 k' 为：

$v_2=-2.171$，$k'=-0.312$

常数计算：

$t_t=61.356$，$t_s=-133.175$，$\lambda=-1.121$

应力计算：

$f_{ci}=19.814\text{MPa}$，$f_{cy}=14.513\text{MPa}$

$\Delta f_y=104.974\text{MPa}$，$f_{co}=-4.715\text{MPa}$，$\Delta f_s=-24.073\text{MPa}$

内力总和：

$F_{ci}=2990.131\text{kN}$，$F_{cy}=135.692\text{kN}$

$F_{co}=-169.310\text{kN}$，$F_s=74.409\text{kN}$

$F=N_0-N_2-(F_{ci}+F_y+F_{co}+F_s)=-0.003$ (kN)

弯矩总和：

$M_{ci}=439230.531$kN·m，$M_y=22626.674$kN·m，$M_{co}=1090.346$kN·m

对于工作荷载准则，取 $e=e_0$

$M_s=520.863$kN·m

$M=M_2+N_0[(1+\lambda_s)h_c-e_0]+N_2[(1+\lambda_s)h_c-e]-(M_{ci}+M_y+M_{co}+M_m+M_s)=-1.447$ (kN·m)

检验：

$f_{ci}=19.814$kPa，$0.55f_c=26.400$kPa

$f_{ci}\leqslant 0.55f_c$　　检验合格

j. WT3 荷载组合：

管侧轴力弯矩：

$N_2=-199.144$kN/m，$M_2=90860.398$ (kN·m)/m

轴力作用线：

$e=138.797$mm，$e_0=124.394$mm

经反复计算得到使轴力弯矩平衡时的值 v_2 和 k' 为：

$v_2=-2.162$，$k'=-0.308$

常数计算：

$t_t=60.996$，$t_s=-131.871$，$\lambda=-1.132$

应力计算：

$f_{ci}=19.868$MPa，$f_{cy}=14.536$MPa

$\Delta f_y=105.141$MPa，$f_{co}=-4.680$MPa，$\Delta f_s=-23.793$MPa

内力总和：

$F_{ci}=2988.940$kN，$F_{cy}=135.908$kN

$F_{co}=-165.854$kN，$F_s=73.545$kN

$F=N_0-N_2-(F_{ci}+F_y+F_{co}+F_s)=0.005$ (kN)

弯矩总和：

$M_{ci}=439997.438$kN·m，$M_y=22662.686$kN·m，$M_{co}=$

1015.828kN·m

对于工作荷载准则，取 $e=e_0$

$M_s=514.814\text{kN}\cdot\text{m}$

$M=M_2+N_0\left[(1+\lambda_s)h_c-e_0\right]+N_2\left[(1+\lambda_s)h_c-e\right]$

$-(M_{ci}+M_y+M_{co}+M_m+M_s)=-6.754\ (\text{kN}\cdot\text{m})$

检验：

$f_{ci}=19.868\text{kPa}$，$0.65f_c=31.200\text{kPa}$

$f_{ci}\leqslant 0.65f_c$　　检验合格

准则内容	荷载组合	v_2	k	计算值	极限值	是否符合准则要求
径向极限张力 $f_{ci}\leqslant 0.55f_c$	W2	−2.171	−0.312	19.814MPa	26.400MPa	符合
径向极限张力 $f_{ci}\leqslant 0.65f_c$	WT3	−2.162	−0.308	19.868MPa	31.200MPa	符合

6）弹性极限状态设计准则检验。

①管顶/管底的弹性极限。

a. WT1 荷载组合：

经反复试算，得到该荷载组合下，满足内力和弯矩平衡的 v_2 和 k 值为：

$v_2=3.246$，$k=0.580$

检验：

$-f_{yr}+n'f_{cr}+\Delta f_y=-82.459\ (\text{MPa})$，$f_{yy}=227.500\text{MPa}$

$-f_{yr}+n'f_{cr}+\Delta f_y\leqslant f_{yy}$　　检验合格

b. WT2 荷载组合：

经反复试算，得到该荷载组合下，满足内力和弯矩平衡的 v_2 和 k 值为：

$v_2=0.518$，$k=0.321$

检验：

$-f_{yr}+n'f_{cr}+\Delta f_y=-135.352\ (\text{MPa})$，$f_{yy}=227.500\text{MPa}$

$-f_{yr}+n'f_{cr}+\Delta f_y \leqslant f_{yy}$　　检验合格

c. FT1 荷载组合：

经反复试算，得到该荷载组合下，满足内力和弯矩平衡的 v_2 和 k 值为：

$v_2=3.557$，$k=0.574$

详细计算公式参见管顶/管底的工作性部分计算。

检验：

$-f_{yr}+n'f_{cr}+\Delta f_y=-79.625$（MPa），$f_{yy}=227.500$MPa

$-f_{yr}+n'f_{cr}+\Delta f_y \leqslant f_{yy}$　　检验合格

d. WT3 荷载组合：

经反复试算，得到该荷载组合下，满足内力和弯矩平衡的 v_2 和 k 值为：

$v_2=-1.125$，$k=-0.028$

检验：

$-f_{yr}+n'f_{cr}+\Delta f_y=-180.047$（MPa）

$-f_{yr}+n'f_{cr}+\Delta f_y \leqslant 0$　　检验合格

准则内容	荷载组合	v_2	k	计算值	极限值	是否符合准则要求
薄钢筒应力 $-f_{yr}+n'f_{cr}+\Delta f_y \leqslant f_{yy}$	WT1	3.246	0.580	−82.459MPa	227.500MPa	符合
	WT2	0.518	0.321	−135.352MPa	227.500MPa	符合
	FT1	3.557	0.574	−79.625MPa	227.500MPa	符合
薄钢筒抗裂 $-f_{yr}+n'f_{cr}+\Delta f_y \leqslant 0$	WT3	−1.125	−0.028	−180.047MPa	0	符合

②管侧的弹性极限：

a. FWT1 荷载组合：

管侧轴力弯矩：

$N_2=2390.488$kN/m，$M_2=99377.789$（kN·m）/m

轴力作用线：

e=130.380mm，e_0=124.394mm

经反复计算得到使轴力弯矩平衡时的值 v_2 和 k' 为：

v_2=1.096，k'=0.400

常数计算：

t_t=43.874，t_s=48.077，λ=3.104

应力计算：

f_{ci}=12.674MPa，f_{cy}=5.260MPa

Δf_y=38.049MPa，f_{co}=3.587MPa，Δf_s=67.832MPa

内力总和：

F_{ci}=874.784kN，F_{cy}=49.183kN

F_{co}=−271.402kN，F_s=−209.669kN

$F=N_0-N_2-(F_{ci}+F_y+F_{co}+F_s)$ =0.015 (kN)

弯矩总和：

M_{ci}=176254.984kN·m，M_y=8201.195kN·m，M_{co}=−14775.026kN·m

M_s=−1467.682kN·m

$M=M_2+N_0[(1+\lambda_s)h_c-e_0]+N_2[(1+\lambda_s)h_c-e]-(M_{ci}+M_y+M_{co}+M_m+M_s)$ =−0.870 (kN·m)

检验：

$-f_{sr}+nf_{cr}+\Delta f_s$=1068.075 (MPa)，$f_{sg}$=1177.500MPa

$-f_{sr}+nf_{cr}+\Delta f_s \leqslant f_{sg}$ 检验合格

b. FWT2 荷载组合：

管侧轴力弯矩：

N_2=1643.626kN/m，M_2=99946.445 (kN·m)/m

轴力作用线：

e=134.176mm，e_0=124.394mm

经反复计算得到使轴力弯矩平衡时的值 v_2 和 k' 为：

v_2=0.108，k'=0.227

常数计算：

t_t=47.096，t_s=5.105，λ=29.235

应力计算：

$f_{ci}=15.206\text{MPa}$，$f_{cy}=8.300\text{MPa}$

$\Delta f_y=60.037\text{MPa}$，$f_{co}=3.984\text{MPa}$，$\Delta f_s=40.242\text{MPa}$

内力总和：

$F_{ci}=1351.848\text{kN}$，$F_{cy}=77.605\text{kN}$

$F_{co}=-115.300\text{kN}$，$F_s=-124.388\text{kN}$

$F=N_0-N_2-(F_{ci}+F_y+F_{co}+F_s)=0.009\ (\text{kN})$

弯矩总和：

$M_{ci}=254463.219\text{kN}\cdot\text{m}$，$M_y=12940.669\text{kN}\cdot\text{m}$，$M_{co}=-4043.255\text{kN}\cdot\text{m}$

$M_s=-870.716\text{kN}\cdot\text{m}$

$M=M_2+N_0[(1+\lambda_s)h_c-e_0]+N_2[(1+\lambda_s)h_c-e]-(M_{ci}+M_y+M_{co}+M_m+M_s)=1.445\ (\text{kN}\cdot\text{m})$

检验：

$-f_{sr}+nf_{cr}+\Delta f_s=1040.485\ (\text{MPa})$，$f_{sg}=1177.500\text{MPa}$

$-f_{sr}+nf_{cr}+\Delta f_s\leqslant f_{sg}$　　检验合格

c. FT2 荷载组合：

管侧轴力弯矩：

$N_2=2219.746\text{kN/m}$，$M_2=109315.563\ (\text{kN}\cdot\text{m})/\text{m}$

轴力作用线：

$e=131.023\text{mm}$，$e_0=124.394\text{mm}$

经反复计算得到使轴力弯矩平衡时的值 v_2 和 k' 为：

$v_2=1.126$，$k'=0.375$

常数计算：

$t_t=40.571$，$t_s=45.695$，$\lambda=3.266$

应力计算：

$f_{ci}=14.270\text{MPa}$，$f_{cy}=6.253\text{MPa}$

$\Delta f_y=45.230\text{MPa}$，$f_{co}=3.574\text{MPa}$，$\Delta f_s=69.544\text{MPa}$

内力总和：

$F_{ci}=1025.538\text{kN}$，$F_{cy}=58.465\text{kN}$

$F_{co}=-255.398\text{kN}$，$F_s=-214.962\text{kN}$

$F=N_0-N_2-(F_{ci}+F_y+F_{co}+F_s)=0.011$（kN）

弯矩总和：

$M_{ci}=204685.766\text{kN}\cdot\text{m}$，$M_y=9748.983\text{kN}\cdot\text{m}$，$M_{co}=-13355.466\text{kN}\cdot\text{m}$

$M_s=-1504.732\text{kN}\cdot\text{m}$

$M=M_2+N_0[(1+\lambda_s)h_c-e_0]+N_2[(1+\lambda_s)h_c-e]-(M_{ci}+M_y+M_{co}+M_m+M_s)=-0.860$（kN·m）

检验：

$-f_{sr}+nf_{cr}+\Delta f_s=1069.788\text{MPa}$，$f_{sg}=1177.500\text{MPa}$

$-f_{sr}+nf_{cr}+\Delta f_s\leqslant f_{sg}$　　检验合格

准则内容	荷载组合	v_2	k	计算值	极限值	是否符合准则要求
$(N_2\leqslant N_k')$ $-f_{sr}+nf_{cr}+\Delta f_s\leqslant f_{sg}$ $(N_2>N_k')$ $M_2\leqslant M_{2cap}(N_2)$	FWT1	1.096	0.400	1068.075MPa	1177.500MPa	符合
	FWT2	0.108	0.227	1040.485MPa	1177.500MPa	符合
	FT2	1.126	0.375	1069.788MPa	1177.500MPa	符合

d. FWT1 荷载组合：

管侧轴力弯矩：

$N_2=2390.488\text{kN/m}$，$M_2=99377.789$（kN·m）/m

轴力作用线：

$e=130.380\text{mm}$，$e_0=124.394\text{mm}$

经反复计算得到使轴力弯矩平衡时的值 v_2 和 k' 为：

$v_2=1.096$，$k'=0.400$

常数计算：

$t_t=43.874$，$t_s=48.077$，$\lambda=3.104$

应力计算：

$f_{ci}=12.674\text{MPa}$，$f_{cy}=5.260\text{MPa}$

$\Delta f_y=38.049\text{MPa}$，$f_{co}=3.587\text{MPa}$，$\Delta f_s=67.832\text{MPa}$

内力总和：

F_{ci}=874.784kN，F_{cy}=49.183kN

F_{co}=−271.402kN，F_s=−209.669kN

$F=N_0-N_2-(F_{ci}+F_y+F_{co}+F_s)$ =0.015 (kN)

弯矩总和：

M_{ci}=176254.984kN·m，M_y=8201.195kN·m，M_{co}=−14775.026kN·m

M_s=−1467.682kN·m

$M=M_2+N_0[(1+\lambda_s)h_c-e_0]+N_2[(1+\lambda_s)h_c-e]-(M_{ci}+M_y+M_{co}+M_m+M_s)$ =−0.870 (kN·m)

检验：

f_{ci}=12.674MPa，$0.75f_c$=36.000MPa

$f_{ci}\leqslant 0.75f_c$　　检验合格

e. FWT2 荷载组合：

管侧轴力弯矩：

N_2=1643.626kN/m，M_2=99946.445 (kN·m)/m

轴力作用线：

e=134.176mm，e_0=124.394mm

经反复计算得到使轴力弯矩平衡时的值 v_2 和 k' 为：

v_2=0.108，k'=0.227

常数计算：

t_t=47.096，t_s=5.105，λ=29.235

应力计算：

f_{ci}=15.206MPa，f_{cy}=8.300MPa

Δf_y=60.037MPa，f_{co}=3.984MPa，Δf_s=40.242MPa

内力总和：

F_{ci}=1351.848kN，F_{cy}=77.605kN

F_{co}=−115.300kN，F_s=−124.388kN

$F=N_0-N_2-(F_{ci}+F_y+F_{co}+F_s)=0.009$（kN）

弯矩总和：

$M_{ci}=254463.219$kN·m，$M_y=12940.669$kN·m，$M_{co}=-4043.255$kN·m

$M_s=-870.716$kN·m

$M=M_2+N_0[(1+\lambda_s)h_c-e_0]+N_2[(1+\lambda_s)h_c-e]-(M_{ci}+M_y+M_{co}+M_m+M_s)=1.445$（kN·m）

检验：

$f_{ci}=15.206$MPa，$0.75f_c=36.000$MPa

$f_{ci}\leqslant 0.75f_c$　　检验合格

f. FT2 荷载组合：

管侧轴力弯矩：

$N_2=2219.746$kN/m，$M_2=109315.563$kN·m/m

轴力作用线：

$e=131.023$mm，$e_0=124.394$mm

经反复计算得到使轴力弯矩平衡时的值 v_2 和 k' 为：

$v_2=1.126$，$k'=0.375$

常数计算：

$t_t=40.571$，$t_s=45.695$，$\lambda=3.266$

应力计算：

$f_{ci}=14.270$MPa，$f_{cy}=6.253$MPa

$\Delta f_y=45.230$MPa，$f_{co}=3.574$MPa，$\Delta f_s=69.544$MPa

内力总和：

$F_{ci}=1025.538$kN，$F_{cy}=58.465$kN

$F_{co}=-255.398$kN，$F_s=-214.962$kN

$F=N_0-N_2-(F_{ci}+F_y+F_{co}+F_s)=0.011$（kN）

弯矩总和：

$M_{ci}=204685.766$kN·m，$M_y=9748.983$kN·m，$M_{co}=$

$-13355.466\text{kN}\cdot\text{m}$

$M_s=-1504.732\text{kN}\cdot\text{m}$

$M=M_2+N_0\left[(1+\lambda_s)h_c-e_0\right]+N_2\left[(1+\lambda_s)h_c-e\right]$

$-(M_{ci}+M_y+M_{co}+M_m+M_s)=-0.860\ (\text{kN}\cdot\text{m})$

检验：

$f_{ci}=14.270\text{MPa}$，$0.75f_c=36.000\text{MPa}$

$f_{ci}\leqslant 0.75f_c$　　检验合格

准则内容	荷载组合	v_2	k	计算值	极限值	是否符合准则要求
混凝土抗压 $f_{ci}\leqslant 0.75f_c$	FWT1	1.096	0.400	12.674MPa	36.000MPa	符合
	FWT2	0.108	0.227	15.206MPa	36.000MPa	符合
	FT2	1.126	0.375	14.270MPa	36.000MPa	符合

7）强度极限状态设计准则检验。

管侧的强度极限：

①FWT3 荷载组合：

管侧轴力弯矩：

$N_2=2825.123\text{kN/m}$，$M_2=117446.469\ (\text{kN}\cdot\text{m})/\text{m}$

轴力作用线：

$e=129.095\text{mm}$，$e_0=124.394\text{mm}$

经反复计算得到使轴力弯矩平衡时的值 v_2 和 k' 为：

$v_2=3.048$，$k'=0.538$

常数计算：

$t_t=30.561$，$t_s=93.140$，$\lambda=1.602$

应力计算：

管芯内表面混凝土应力 $f_{ci}=0.85f'_c=14.010\text{MPa}$

薄钢筒内部的混凝土应力 $f_{cy}=3.367\text{MPa}$

管芯混凝土零应力时薄钢筒中相应的应力

$\Delta f_y=E_y\Delta\varepsilon_y=24.357\text{MPa}$ 且 $\Delta f_y\leqslant f_{yy}-f_{yr}+n'f_{cr}$

管芯混凝土零应力时外层钢丝中相应的应力 $\Delta f_s=f_s(\varepsilon_s)$

$+f_{sr}-nf_{cr}=125.631$（MPa）

内力总和：

应满足条件$\sum F=0$，即 $N_0-N_2=F_{ci}+F_y+F_s$

内层混凝土所受的轴力 $F_{ci}=744.635$kN

外层混凝土所受的轴力 $F_{co}=-379.539$kN

薄钢筒所受的轴力 $F_{cy}=31.484$kN

预应力钢丝所受的轴力 $F_s=-388.324$kN

$F=N_0-N_2-(F_{ci}+F_y+F_{co}+F_s)=0.021$（kN）

内力平衡条件满足

弯矩总和：

应满足条件$\sum M=0$，即 $M_2+(N_0-N_2)[(1+\lambda_s)h_c-e_0]=M_{ci}+M_y$

内层混凝土截面所受的弯矩 $M_{ci}=157912.484$kN·m

薄钢筒截面所受的弯矩 $M_y=5249.964$kN·m

外层混凝土截面所受的弯矩 $M_{co}=-28697.789$kN·m

预应力钢丝截面所受的弯矩 $M_s=-2718.268$kN·m

$M=M_2+N_0[(1+\lambda_s)h_c-e_0]+N_2[(1+\lambda_s)h_c-e]-(M_{ci}+M_y+M_{co}+M_m+M_s)=0.626$（kN·m）

弯矩平衡满足要求

检验：

$-f_{sr}+nf_{cr}+\Delta f_s=1125.874$MPa，$f_{sy}=1334.500$MPa

$-f_{sr}+nf_{cr}+\Delta f_s\leqslant f_{sy}$　　检验合格

②FWT4 荷载组合：

管侧轴力弯矩：

$N_2=1942.467$kN/m，$M_2=118118.516$（kN·m）/m

轴力作用线：

$e=132.307$mm，$e_0=124.394$mm

经反复计算得到使轴力弯矩平衡时的值 v_2 和 k'为：

$v_2=0.946$，$k'=0.328$

常数计算：

t_t=38.792，t_s=36.682，λ=4.069

应力计算：

f_{ci}=16.045MPa，f_{cy}=7.660MPa

Δf_y=55.408MPa，f_{co}=3.647MPa，Δf_s=65.169MPa

内力总和：

F_{ci}=1239.660kN，F_{cy}=71.622kN

F_{co}=−218.892kN，F_s=−201.437kN

$F=N_0-N_2-(F_{ci}+F_y+F_{co}+F_s)$ =−0.020（kN）

弯矩总和：

M_{ci}=242962.781kN·m，M_y=11942.930kN·m，M_{co}=−10331.187kN·m

M_s=−1410.056kN·m

$M=M_2+N_0[(1+\lambda_s)h_c-e_0]+N_2[(1+\lambda_s)h_c-e]$
$-(M_{ci}+M_y+M_{co}+M_m+M_s)$ =2.842（kN·m）

检验：

$-f_{sr}+nf_{cr}+\Delta f_s$=1065.412（MPa），$f_{sy}$=1334.500MPa

$-f_{sr}+nf_{cr}+\Delta f_s \leqslant f_{sy}$　　检验合格

准则内容	荷载组合	v_2	k	计算值	极限值	是否符合准则要求
$(N_2 \leqslant N_k')$ $-f_{sr}+nf_{cr}$ $+\Delta f_s \leqslant f_{sy}$	FWT3	3.048	0.538	1125.874MPa	1334.500MPa	符合
$(N_2>N_k')$ $M_2 \leqslant M_{2cap}(N_2)$	FWT4	0.946	0.328	1065.412MPa	1334.500MPa	符合

③FWT5 荷载组合：

管侧轴力弯矩：

N_2=−319.281kN/m，M_2=145583.422（kN·m）/m

轴力作用线：

e=138.797mm，e_0=124.394mm

经反复计算得到使轴力弯矩平衡时的值 k'为：

$k'=0.572$

应力计算：

$f_{ci}=40.800\text{MPa}$，$f_{cy}=40.800\text{MPa}$

$\Delta f_y=96.255\text{MPa}$，$\Delta f_s=321.990\text{MPa}$

内力总和：

$F_{ci}=4056.670\text{kN}$，$F_{cy}=83.183\text{kN}$

$F_s=-987.195\text{kN}$

$F=N_0-N_2-(F_{ci}+F_y+F_{co}+F_s)=0.023\ (\text{kN})$

弯矩计算：

$M_{ci}=802352.250\text{kN}\cdot\text{m}$，$M_y=13870.729\text{kN}\cdot\text{m}$

$M=-(N_0-n_2)[(1+\lambda_s)h_c-e_0]+N_2[(1+\lambda_s)h_c-e]-(M_{ci}+M_y)=428109.813\ (\text{kN}\cdot\text{m})$

$M_2\leqslant M_{ult}$　　检验合格

准则内容	荷载组合	v_2	k	计算值	极限值	是否符合准则要求
极限弯矩 $M\leqslant M_{ult}$	FWT5	—	0.572	145583.422MPa	428109.813MPa	符合

④开裂压力：

FWT6 荷载组合：

管道内压$P=2160.000\text{MPa}$，开裂内压 $P_0=2826.399\text{MPa}$

$P\leqslant P_b$　　检验合格

准则内容	荷载组合	P	极限值	是否符合准则要求
开裂压力 $P\leqslant P_b$	FWT6	2160.000MPa	2826.399MPa	符合

经检验，采用 7mm 钢丝 2 层缠绕、钢丝面积 3091mm^2、钢丝间距 24.901mm 的配筋设计，符合本规范各项设计准则的要求，其中控制条件为检验准则管芯极限拉应变 $\varepsilon_{ci}\leqslant 1.5\varepsilon'_t$。

附录 F　管道镇墩（支墩）和限制接头推力标准值计算

本附录未涉及的管道镇墩（支墩）承受的内水推力标准值计算方法，可参阅 AWWA M9 进行计算。也可全部采用 AWWA M9 中的方法对管道镇墩（支墩）和限制接头进行设计。