

环形预应力混凝土结构设计计算方法

赵顺波 李晓克 李风兰

(华北水利水电学院 郑州 450011)

摘 要: 本文是作者对环形预应力混凝土结构研究试验的主要成果。业经多项工程设计检验, 陆续在有关学报、刊物上介绍。现综合总结发表, 供同类工程设计计算参考。

关键词: 环形预应力 混凝土结构 设计计算方法

1. 概述

环形预应力混凝土结构指圆形或椭圆形闭合断面的特种混凝土结构。自20世纪70年代初期, 在意大利建设的几座抽水蓄能电站调压井和引水隧洞成功应用以来, 目前在国内外已广泛应用于混凝土压力管道, 压力引水隧洞, 储水池、沉淀池、消化池、物料筒仓、核电站安全壳、桥塔锚固区、电视塔环板基础等工程领域。但在此种结构的设计计算方面尚未见比较成熟的方法公布于世。对此, 作者在水利部水利科技重点项目基金和河南省教师资助计划项目的支持下, 开展了理论分析和试验研究工作, 参加了黄河小浪底水利枢纽工程排沙洞预应力混凝土衬砌工程足尺节段试验及施工实践, 东江—深圳供水改造工程预应力混凝土压力管道的足尺节段试验, 以及郑州市新庄污水处理厂预应力混凝土污水沉淀池和污泥消化池、郑州市五龙口污水处理厂预应力混凝土污水沉淀池、南水北调中线倒虹吸工程等研究试验、方案设计、技术咨询等工作。在研究试验的基础上, 作者初步总结出: 预应力混凝土压力管道在单环预应力作用下的内力理论计算公式, 为实现压力管道各断面能够建立相同均匀预压应力的预应力筋束最大间距的计算方法, 为减少施工期管壁混凝土轴向次弯矩的预应力筋束分步张拉施工与荷载控制验算方法, 运行期预应力混凝土压力管道抗断性能验算方法, 预应力混凝土压力管道极限承载力设计方法等。现概况介绍如下, 以供同类工程参考, 并希望得到专家学者的指导与帮助。

2. 环形预应力作用机理

环形预应力技术是通过张拉环形预应力钢绞线束对管道混凝土施加预压应力, 曲线预应力钢

绞线束在预应力形成机理上与直线预应力钢绞线束有所不同, 直线预应力钢绞线束主要靠锚头挤压构件端部, 藉此向内传递压力; 而环形预应力钢绞线束则主要通过预应力钢绞线束张拉变形挤压孔道壁, 使管体混凝土截面内形成预压应力。

取平面曲线预应力钢绞线束微段分离体如图1所示, 根据静力平衡方程, 向微段曲率中心O取矩有

$$dF + dT = 0 \quad (1)$$

由摩擦原理, 张拉过程微段摩擦力dF总有

$$dF = \mu_0 p ds \quad (2)$$

向微段中心法向投影并略去高阶微量得

$$T d\theta = p ds \quad (3)$$

$$\text{又 } ds = \rho d\theta \quad (4)$$

$$\text{则 } p = T/\rho; f = \mu_0 p \quad (5)$$

其中 μ_0 为预应力钢绞线束与孔道间的摩擦系数; f 为预应力钢绞线束与孔道间的摩擦力集度; p 为预应力钢绞线束与孔道间的压力集度; T 为计算截面处预应力钢绞线束张拉力; ρ 为计算截面曲率半径。

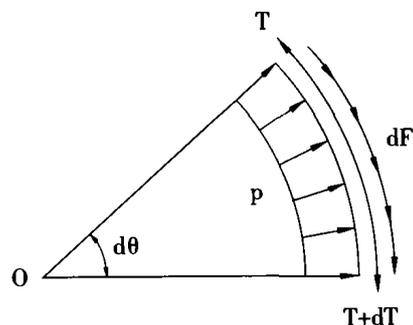


图1 环形预应力作用机理示意图

由于环形预应力钢绞线束与孔道壁之间的摩擦引起的预应力损失在全部预应力损失中所占比例相对较大,因此,在进行结构计算时不仅要考虑预应力钢绞线束对孔道的径向挤压力,还应考虑预应力钢绞线束张拉和锚固时对孔道的切向拖曳力。

3. 预应力混凝土压力管道施工阶段验算

预应力混凝土压力管道在预应力筋束张拉施工阶段,将因预应力筋束的环箍作用引起较大的管壁次弯矩,使管壁内表面沿轴线方向产生拉应力。因此,验算目的之一是控制该拉应力不超过允许值,避免管壁混凝土内表面出现连续分布的环形裂缝。同时,由于单环预应力筋束的预压作用沿混凝土压力管道轴向的传递有一定范围,应控制环形预应力筋束的轴向间距,保证管道各横断面环向预压应力的均匀性。

3.1 单环预应力作用效应计算

为确定单环预应力作用下混凝土管道的受力状态,可将管壁简化为支撑在弹性地基上的梁。设预应力筋束张拉荷载产生沿圆周均匀分布的径向压力,沿圆周单位长度上的压力为 F_{zl} ,指向管道断面圆心为正。管道受力后的变形如图2A中的虚线所示,离预应力筋束所在断面 x 处的管道径向位移为 w ,取高度为 dx ,环向为单位弧长的微分体作为研究对象(图2B),微分体径向断面作用有环向力 N_θ 和环向弯矩 M_θ ,铅直断面作用有竖向弯矩 M_x 和剪力 V_x ,它们沿管道长度变化而与极坐标角 θ 无关,其中 N_θ 受拉为正, M_x 和 M_θ 使管道外侧受拉为正, V_x 指向朝外为正。

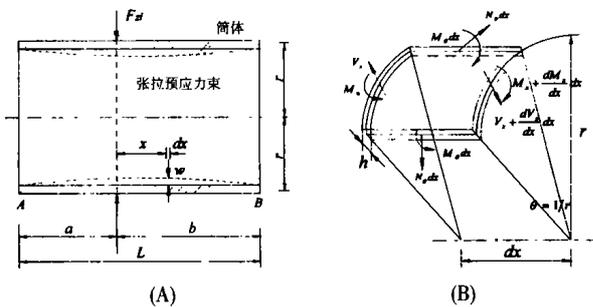


图2 单环预应力作用下混凝土压力管道微分体受力分析

由微分体静力平衡条件、变形和位移之间的几何关系及应力和应变间的物理关系,可建立下列关系式:

$$N_\theta = \frac{Eh}{r}w, M_x = -D \frac{d^2w}{dx^2}, M_\theta = \mu M_x, V_x = -D \frac{dw}{dx} \quad (6)$$

$$\frac{dw}{dx} + \frac{Eh}{Dr}w = 0, \text{ 或 } \frac{dw}{dx} + \frac{4}{S}w = 0, \quad (7)$$

式中 r 为管道计算半径, h 为管壁厚度, E 为弹性模量, μ 为材料泊松比(对混凝土取为1/6), D 为壳板抗弯刚度, S 为圆柱壳的弹性特征值。壳板抗弯刚度 D 和圆柱壳弹性特征值 S 可分别由下式计算确定

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)} \approx 0.086Eh^3; S = \sqrt{\frac{r^3h^2}{3(1-\mu^2)}} \approx 0.765\sqrt{rh} \quad (8)$$

根据单环预应力作用位置,可将预应力混凝土压力管道的受力按无限长、半无限长和有限长三种管道类型计算。

对无限长预应力混凝土压力管道,由微分方程(7)可确定单环预应力作用下管壁混凝土的径向位移 w 为

$$w = \frac{F_{zl}r^2}{2EhS} e^{-\frac{x}{S}} \left(\cos \frac{x}{S} + \sin \frac{x}{S} \right) \quad (9)$$

其坐标原点为 F_{zl} 的作用点。

对半无限长预应力混凝土压力管道,单环预应力作用下管壁混凝土的径向位移 w 为

$$w = \frac{F_{zl}r^2}{2EhS} \left[-2(C_a + D_a)B_x + 2(C_a + 2D_a)A_x + A_{|a-x|} \right] \quad (10)$$

$$\text{式中 } A_x = e^{-\frac{x}{S}} \left(\cos \frac{x}{S} + \sin \frac{x}{S} \right), B_x = e^{-\frac{x}{S}} \sin \frac{x}{S},$$

$$C_x = e^{-\frac{x}{S}} \left(\cos \frac{x}{S} - \sin \frac{x}{S} \right), D_x = e^{-\frac{x}{S}} \cos \frac{x}{S}, C_a, D_a$$

分别为当 $x=a$ 时 C_x 、 D_x 的值, $A_{|a-x|}$ 分别为当 $x=|a-x|$ 时 A_x 的值, x 值从管道A端起算。

对有限长预应力混凝土压力管道,单环预应力作用下管壁的径向位移 w 为

$$w = \frac{F_{zl}r^2}{EhS} \bar{w} \quad (11)$$

式中 \bar{w} 为预应力混凝土压力管道的挠度系数,由下式求得

$$\bar{w} = \frac{1}{sh^2 \frac{L}{S} - \sin^2 \frac{L}{S}} \left\{ 2ch \frac{x}{S} \cos \frac{x}{S} \left(sh \frac{L}{S} \cos \frac{a}{S} ch \frac{b}{S} - \sin \frac{L}{S} ch \frac{a}{S} \cos \frac{b}{S} \right) + \left(ch \frac{x}{S} \sin \frac{x}{S} + sh \frac{x}{S} \cos \frac{x}{S} \right) \right. \\ \left. \times \left[sh \frac{L}{S} \left(\sin \frac{a}{S} ch \frac{b}{S} - \cos \frac{a}{S} sh \frac{b}{S} \right) + \sin \frac{L}{S} \left(sh \frac{a}{S} \cos \frac{b}{S} - ch \frac{a}{S} \sin \frac{b}{S} \right) \right] \right\} \quad (12)$$

x 值从管道A端起算且 $x \leq a$,当 $x > a$ 时,上述各式 a 、 b 位置交换且 x 从B端起算。

由式(1)可知,无限长预应力混凝土压力管道径向位移随 x 的增加迅速衰减。在 $x=2\pi S$ 处的径向位移仅为 $x=0$ 处径向位移的0.187%;在 $x=\pi S$ 处的径向位移仅为 $x=0$ 处径向位移的4.3%。因此当预应力筋束的作用位置与管道两端的距离 $x \geq \pi S$ 时,可按无限长预应力混凝土压力管道计算;当预应力筋束所在断面与一端的距离小于 πS ,与另一端距离大于 πS 时,可按半无限长预应力混凝土压力管道计算;当预应力筋束所在断面与两端的距离都小于 πS 时,可按有限长预应力混凝土压力管道计算。

确定管道具体类型后,无限长、半无限长和有限长三种预应力混凝土压力管道的内力可分别由式(6)与式(9)、(10)或(11)经推导确定,其内力表达式如表1所示,且拉为正、压为负。

对无限长、半无限长和有限长预应力混凝土压力管道,混凝土环向压应力从预应力筋束所在断面的 σ_θ 沿管道轴向减小到 $\sigma_\theta/2$ 断面后,两断面轴向距离 $x_{0.5}$ 可分别由下述各式确定:

$$X_{0.5}=1.01S \quad (13)$$

对半无限长预应力混凝土压力管道,

$$\begin{aligned} &[-2(C_a+D_a)B_{x_{0.5}}+(C_a+2D_a)A_{x_{0.5}}+A_{|a-x_{0.5}}] \\ &-\frac{1}{2}[-2(C_a+D_a)B_a+(C_a+2D_a)A_a+A_0]=0 \end{aligned} \quad (14)$$

对有限长预应力混凝土压力管道,

$$\bar{w}_{x_{0.5}}-0.5\bar{w}_{x=a}=0 \text{ 或 } \bar{w}_{x_{0.5}}-0.5\bar{w}_{x=b}=0 \quad (15)$$

3.2 管道施工阶段抗裂验算

为满足预应力混凝土压力管道施工阶段的抗裂要求,预应力筋束张拉时管壁混凝土内表面的最大轴向拉应力应满足条件

$$\sigma_{x,inner} \leq \alpha_{ct} \gamma f_{tk} \quad (16)$$

其中 α_{ct} 为混凝土拉应力限制系数,根据规范SL/T191-96取值为0.50; γ 为受拉区混凝土塑性影响系数,根据规范SL/T191-96按受弯构件确定; f_{tk} 为混凝土抗拉强度标准值。

抗裂验算时首先应根据预应力筋束作用位置距管道两端的距离是否大于 πS 判断管道类型,再由表1确定相应的 $\sigma_{x,inner}$ 。通过对国内外预应力混凝土压力管道工程资料统计分析,单环预应力作用下混凝土压力管道理论计算模型和管道结构的实际受力状态存在差异,应将计算的 $\sigma_{x,inner}$ 值除以系数1.27作为管壁混凝土内表面的最大轴向拉应力。

如果式(16)不满足,说明预应力筋束一次全部张拉到100%张拉控制力时,预应力混凝土压力管道将不满足内表面的抗裂要求,应采取分阶段张拉的施工措施,使

$$k\sigma_{x,inner} \leq \alpha_{ct} \gamma f_{tk} \quad (17)$$

其中 K 为分阶段张拉时张拉力 F_{z1} 的系数($K \leq 1.0$)。

3.3 相邻预应力筋束的最大间距验算

为保证全部预应力筋束张拉完成后在管壁混凝土全长范围内建立起均匀等值的环向预压应

表1 预应力混凝土压力管道内力理论计算公式

内力	无限长	半无限长	有限长
管壁混凝土内表面轴向拉应力 $\sigma_{x,inner}$	$\frac{1.458F_p S}{h^2} e^{-\frac{x}{S}} \left(\cos \frac{x}{S} - \sin \frac{x}{S} \right)$	$\frac{1.458F_p S}{h^2} [-2(C_a+D_a)D_x + 2(C_a+2D_a)C_x + C_{ a-x }]$	$\frac{2.917F_p S}{h^2} \bar{M}$
管壁混凝土内、外表面环向应力 $\sigma_{\theta,inner}$	$-\frac{F_p r}{2hS} e^{-\frac{x}{S}} \left(\cos \frac{x}{S} + \sin \frac{x}{S} \right) + \frac{F_p S}{4h^2} e^{-\frac{x}{S}} \left(\cos \frac{x}{S} - \sin \frac{x}{S} \right)$	$-\frac{F_p r}{2hS} [-2(C_a+D_a)B_x + (C_a+2D_a)A_x + A_{ a-x }] + \frac{F_p S}{4h^2} [-2(C_a+D_a)D_x + (C_a+2D_a)C_x + C_{ a-x }]$	$-\frac{F_p r}{hS} \bar{w} + \frac{F_p S}{2h^2} \bar{M}$
管壁混凝土平均环向应力 $\sigma_{\theta,average}$	$-\frac{F_p r}{2hS} e^{-\frac{x}{S}} \left(\cos \frac{x}{S} + \sin \frac{x}{S} \right)$	$-\frac{F_p r}{2hS} [-2(C_a+D_a)B_x + (C_a+2D_a)A_x + A_{ a-x }]$	$-\frac{F_p r}{hS} \bar{w}$

注:表中 \bar{M} 为有限长预应力混凝土压力管道的弯矩系数,由Hetenyi集中荷载作用下有限长弹性地基梁的计算公式确定^[7]。

力, 相邻预应力筋束的最大间距不应超过 $2x_{0.5}$, $x_{0.5}$ 由式(13)、(14)或(15)的计算值除以系数1.18确定。

4. 预应力混凝土压力管道使用阶段验算

4.1 全部预应力作用效应计算

在使用阶段, 预应力混凝土压力管道混凝土不出现拉应力或仅出现有限拉应力, 因此可假定所有材料均处于弹性工作状态, 将其简化为线弹性双层圆筒轴对称平面形变计算模型, 如图3所示。双层圆筒由内向外半径分别为 r_1 、 r_p 和 r_2 。内水压力为 q_1 、施加预应力引起的径向外压为 q_2 , 两圆筒间接触应力为 q_c , q_1 、 q_2 或 q_c 均以指向管体混凝土内部为正。在两圆筒组合作用下, 已知 q_1 、 q_2 , 两圆筒间的接触应力 q_c 未知。

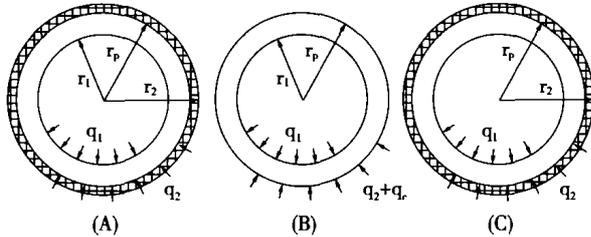


图3 预应力混凝土压力管道多层环轴对称计算模型

根据变形协调条件, 在 $r=r_p$ 处内筒径向位移 $W'_{r=r_p}$ 等于外筒径向位移 $W''_{r=r_p}$, 由弹性力学单个圆筒承受均布压力荷载的拉密解答, 经推导可得两圆筒间接触应力 q_c , 为

$$q_c = \frac{(r_2^2 - r_p^2)}{2r_p^2(r_2^2 - r_1^2)} \left\{ \left[\frac{\mu}{1-\mu} (r_p^2 - r_1^2) + (r_p^2 + r_1^2) \right] q_2 + 2r_1^2 q_1 \right\} \quad (18)$$

其中 μ 为材料泊松比。

选取内层圆筒脱离体为研究对象(图3B), 其环向应力 σ_θ 、径向应力 σ_r , 分别为

$$\sigma_\theta = \frac{r_p^2 + 1}{\frac{r_p^2}{r_1^2} - 1} q_1 - \frac{1 + \frac{r_1^2}{r_p^2}}{1 - \frac{r_1^2}{r_p^2}} (q_2 + q_c),$$

$$\sigma_r = -\frac{r_p^2 - 1}{\frac{r_p^2}{r_1^2} - 1} q_1 - \frac{1 - \frac{r_1^2}{r_p^2}}{1 - \frac{r_1^2}{r_p^2}} (q_2 + q_c) \quad (r_1 \leq r \leq r_p) \quad (19)$$

其应力符号拉为正、压为负, 以下均相同:

选取外层圆筒脱离体为研究对象(图3C), 其环向应力 σ_θ 、径向应力 σ_r 分别为

$$\sigma_\theta = \frac{\frac{r_2^2}{r_p^2} + 1}{\frac{r_2^2}{r_p^2} - 1} q_c, \quad \sigma_r = -\frac{\frac{r_2^2}{r_p^2} - 1}{\frac{r_2^2}{r_p^2} - 1} q_c \quad (r_p \leq r \leq r_2) \quad (20)$$

当 $r=r_1$ 时, 可得压力管道管壁内表面的环向应力 σ_{θ,r_1} 为

$$\sigma_{\theta,r_1} = \frac{r_p^2 + r_1^2}{r_p^2 - r_1^2} q_1 - \frac{2r_p^2}{r_p^2 - r_1^2} (q_2 + q_c) \quad (21)$$

当 $r=r_2$ 时, 可得压力管道管壁外表面的环向应力 σ_{θ,r_2} 为

$$\sigma_{\theta,r_2} = \frac{2r_p^2}{r_2^2 - r_p^2} q_c \quad (22)$$

预应力筋束所在环外侧的径向应力为

$$\sigma_{r_p,Outer} = -q_c \quad (23)$$

4.2 管道运行阶段验算

可以证明: 运行阶段预应力混凝土压力管道的抗裂由内表面控制, 即使使

$$\sigma_{\theta,r_1} \leq \alpha_c f_{tk} \quad (24)$$

令 $q_1 = p_{hd}$, 经推导整理可得单位长度预应力混凝土压力管道所需环向预应力筋束的截面面积 A_y 为

$$A_y \geq \frac{r_p (r_2^2 + r_1^2) p_{hd} - r_p (r_2^2 - r_1^2) \alpha_c f_{tk}}{\left[(r_2^2 + r_1^2) + \frac{\mu}{1-\mu} (r_2^2 - r_1^2) \right] \sigma_{pe}} \quad (25)$$

其中 A_y 为单位长度管道内预应力筋束的截面面积; σ_{pe} 为预应力筋束的有效预应力; p_{hd} 为设计内水压力;

α_c 为混凝土拉应力限制系数, 根据规范SL/T191-96, 取值为0.30。

4.3 管道检修阶段验算

在预应力混凝土压力管道检修阶段应保证预应力筋束环面的混凝土径向拉应力不超过限制, 即使使

$$\sigma_{r_p,Outer} \leq \alpha_c f_{tk} \quad (26)$$

经推导可求得单位长度预应力混凝土压力管

(下转第7页)

可靠的保障,还可以节约大量的维修维护费用。

4.7 要重视管养。重新建、轻维护是目前的普遍现象。加之,大多数管养部门安全检测人力、设备及专业技能不足,检测、评估及维护系统未能有效建立与正常运行。因此,要加强维修维护系统及制度的建立,采用有效的检测方法和手段,配备足够的资源确保桥梁的安全使用。

5. 结束语

由于受产品技术、结构设计、工程施工及管养等诸多因素的影响,目前,拱桥吊杆及同类拉索的病害普遍存在,并严重影响工程的使用寿命,威胁人民生命财产的安全。

系统地研究拉索病害,分析其病因,采取有效的措施,防止病害的发生,对提高工程的可靠性与耐久性是非常重要的。

本文结合项目研究的成果,系统地剖析拉索病害,并研究相应的对策与防范措施,对推动相关研究有积极的作用。特别是PES(FD)低应力

防腐拉索技术,引入应力释放的概念,有效降低拉索PE护套的工作应力,提高拉索PE护套的抗开裂能力和提高拉索的使用寿命。

随着技术研究的不断深入与开展,新材料、新技术,如:FRP拉索,可监控智能拉索的应用,可大大提高拉索的安全性及耐久性。

参考文献

[1] 龙跃等.OVMLZM拱桥吊杆体系.项目研究报告.2004.4
 [2] 本文参考并引用西南交大夏招广教授、厦门市路桥建设投资公司徐风云高级工程师的相关资料。
 [3] 柳州欧维姆机械有限责任公司企业标准.热挤聚乙烯高强度钢丝拉索(Q/OVM 010-2003).柳州市质量技术监督局.2003
 [4] 张荻薇.新世纪台湾桥梁的技术发展与愿景.21世纪桥梁技术发展论坛论文集(P55~72).浙江杭州.2002.9
 [5] 中华人民共和国国家标准.斜拉桥热挤聚乙烯高强度钢丝拉索技术条件(GB/T 18365-2001).中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.2001
 [6] 中华人民共和国国家标准.预应力用锚具、夹具和连接器(GB/T 14370-2000).中华人民共和国国家质量技术监督局.2000
 [7] 中华人民共和国国家标准.聚乙烯环境应力开裂试验方法(GB/T 1842-1999).中华人民共和国国家质量技术监督局.1999

(上接第11页)

道环向预应力筋束截面面积 A_y 的允许值为

$$A_y \leq \frac{2r_p^2(r_2^2 - r_1^2)\alpha_{ci}f_{tk} + 2r_1^2r_p(r_2^2 - r_1^2)q_1}{\left[(r_p + r_1) - \frac{\mu}{1-\mu}(r_p - r_1) \right] (r_2^2 - r_1^2)\sigma_{pe}} \quad (27)$$

其中 α_{ci} 为混凝土拉应力限制系数,根据规范SL/T191-96,取值为0.30。

5. 预应力混凝土压力管道极限承载力验算

为保证结构的安全性,预应力混凝土压力管道在预应力和内水压力共同作用下,其极限承载能力应满足以下要求

$$\gamma_0 \psi \gamma_Q P_{hd} r_1 \leq \frac{1}{\gamma_d} (A_y f_y + A_s f_s) \quad (28)$$

其中 f_y 为预应力筋束抗拉强度设计值; A_s 为单位长度管道内环向非预应力钢筋截面面积; f_s 为非预应力钢筋强度设计值; γ_0 为结构重要性系数; ψ 为设计状况系数; γ_Q 为设计内水压力 P_{hd} 分项系数; γ_d 为结构系数。相关系数的取值均依规范SL/T191-96的具体规定予以确定。

6. 管道断面形式对预应力效果的影响

实际工程中的预应力混凝土压力管道断面形式一般为均匀圆环形、马蹄形或变壁厚圆环形等(图4)。均匀圆环形管道常用于带镇墩的地面管或桥式倒虹吸,马蹄形管道用于不带镇墩的地面管、浅埋式管或地下倒虹吸管,变壁厚圆环形管道则常用于压力隧洞衬砌(因隧洞成型开挖局部凹凸形成)。

采用三维有限元方法对比分析了预应力混凝土压力管道不同断面形式对内力分布的影响,结果表明:对马蹄形、变壁厚圆环形等断面形式的预应力混凝土压力管道,均以其最小壁厚作为控制参数按均匀圆环形管道进行设计和验算是可行的。

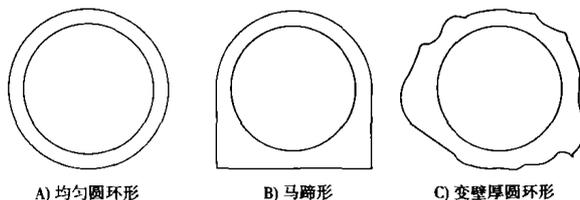


图4 预应力混凝土压力管道断面形式

(下期待续)