

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2021.05.012

BCCP 结构设计计算方法与设计准则

孙岳阳¹, 胡少伟², 明攀³, 黄逸群⁴

(1. 苏州科技大学土木工程学院, 江苏 苏州 215011; 2. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045;
3. 南京水利科学研究院材料结构研究所, 江苏 南京 210024; 4. 河海大学力学与材料学院, 江苏 南京 211100)

摘要: 为设计钢筋缠绕钢筒混凝土压力管(BCCP), 参考 PCCP 规范, 提出适用于 BCCP 的外荷载和截面内力计算方法。考虑保护层对整管截面刚度的贡献, 通过不同荷载组合工况下截面应力应变线性分布的假设, 给出 BCCP 中管芯、钢筒、钢筋和保护层的应力应变计算方法。设计时遵循工作极限状态、弹性极限状态和强度极限状态设计准则, 提出各个极限状态具体的准则条件。选用实际工程中内径 2000 mm 的埋置式 BCCP 进行计算, 结果表明该管型在各个荷载组合工况下计算的判断指标都比相应的设计准则要小, 结构是安全的。

关键词: 钢筋缠绕钢筒混凝土压力管(BCCP); 应力; 应变; 极限状态; 设计计算; 设计准则

中图分类号: TV314 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2021)05-0460-06

Structural design calculation method and design criteria of BCCP

SUN Yueyang¹, HU Shaowei², MING Pan³, HUANG Yiqun⁴

(1. School of Civil Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215011, China;
2. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China;
3. Materials & Structural Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China;
4. College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: To design and calculate the bar-wrapped cylinder concrete pressure pipe (BCCP), the calculation method of external load and section internal forces of BCCP is proposed by referring to the specifications of PCCP in this study. With the consideration of the contribution of the protective cover to the stiffness of whole pipe section, the formulas for calculating the stress and strain of pipe core, cylinder, steel bar and protective cover in BCCP are put forward by using the assumption of the linear distribution of stress and strain on the cross-sectional surface under different load combination. The work, elasticity and strength limit state design criteria are followed in the design, and the specific criterion conditions of each limit state are given. An embedded BCCP with an inner diameter of 2000 mm is selected for examination. The results show that the judgment indexes of the pipe are smaller than the corresponding design criteria and the structure is safe.

Key words: bar-wrapped cylinder concrete pressure pipe (BCCP); stress; strain; limit state; design calculation; design criteria

钢筋缠绕钢筒混凝土压力管(bar-wrapped cylinder concrete pressure pipe, BCCP)是传统预应力钢筒混凝土管(prestressed concrete cylinder pipe, PCCP)的升级替代产品,它是由带钢筒的高强混凝土管芯在缠绕预应力钢筋后,再浇筑细石混凝土保护层而制成的新型复合管材,结构如图 1 所示。与 PCCP 相比, BCCP 具有 2 个主要特点^[1]: (a)使用较粗的冷轧带肋预应力钢筋,钢筋直径 8~10 mm,应力等级低,屈服强度为 650 MPa 或 970 MPa,而 PCCP 中使用的是 1570 MPa 的高强预应力钢丝,低应力的冷扎带肋钢筋解决了 PCCP 中高应力钢丝存在的应力脆化问题。(b)相比 PCCP 中 25 mm 左右厚度的砂浆保护层, BCCP 在带肋钢筋上浇筑 50~60 mm 厚度的细石混凝土保护层,具有更密实、高强、抗拉、防腐的优越性能。BCCP 自诞生到应用还不到 5 a, 相关研究较少, Hu 等^[24]建立了 BCCP 缠筋模型,研究了预应力损失对其受力性能的影响以及地

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51739008); 国家重大科研仪器研制项目(51527811)
作者简介: 孙岳阳(1992—), 男, 讲师, 博士, 主要从事预应力混凝土管道研究。E-mail: syyang0118@126.com
通信作者: 胡少伟, 教授。E-mail: hushaowei@cqu.edu.cn
引用本文: 孙岳阳, 胡少伟, 明攀, 等. BCCP 结构设计计算方法与设计准则[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(5): 460-465.
SUN Yueyang, HU Shaowei, MING Pan, et al. Structural design calculation method and design criteria of BCCP [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(5): 460-465.

基沉降对接口力学性能的影响。

目前,国内关于 PCCP 结构设计分析方法主要采用极限状态法,其中 AWWA C304—2007 “Standard for design of prestressed concrete cylinder pipe”^[5]和 SL702—2015《预应力钢筒混凝土管道技术规范》^[6]以工作、弹性和强度 3 种极限状态作为设计准则,考虑不同的荷载组合工况,计算管顶、管底和管腰等特殊部位截面的应力应变分布,逐一验证其是否满足各极限状态设计准则的要求。CECS140—2011《给水排水工程埋地预应力混凝土管和预应力钢筒混凝土管管道结构设计规程》^[7]则采用以概率论为基础的极限状态计算方法,分别按照承载能力和正常使用 2 种极限状态计算各工况下作用效应组合与抗力设计值,并逐一验证是否满足各极限状态设计准则的要求。BCCP 在预应力钢筋和保护层上与 PCCP 有明显不同,PCCP 在进行结构设计计算时往往忽略砂浆保护层对整管截面刚度的贡献,而 BCCP 中细石混凝土保护层的厚度较厚,结构设计计算时需考虑保护层的自重以及对整管截面刚度的贡献。如果直接使用 PCCP 的相关设计规范进行结构设计计算,设计结果往往偏于保守或误差较大。为此,本文依据国内外相关 PCCP 设计规范以及 BCCP 的材料组成,提出一套适用于 BCCP 的结构设计计算分析方法与设计准则,并选取实际工程案例进行计算,以期能为 BCCP 的结构设计提供参考。

1 结构设计计算方法

BCCP 结构计算流程:(a)根据工程经验拟定 BCCP 尺寸,主要包括混凝土管芯厚度、钢筒厚度、钢筒外径、预应力钢筋直径、箍筋间距和混凝土保护层厚度;(b)计算各种荷载组合工况下管顶、管底和管腰等关键截面的内力与应力应变;(c)将计算结果与极限状态设计准则的条件进行对比,根据对比结果不断调整各层结构和尺寸,使最终设计的 BCCP 满足所有准则要求。计算的主要内容包括外荷载计算、关键截面的内力与应力应变计算。

1.1 外荷载计算

在实际埋置条件下,BCCP 承受的主要外荷载为土荷载、路面活荷载、内水压力、管体自重和管内水重。其中土荷载的参考文献[7-8]计算,按照敷设方式的不同将 BCCP 分为沟埋管和填埋管。路面活荷载主要包括公路荷载和铁路荷载,内水压力主要分为管道的工作压力、瞬时压力和现场试验压力。路面活荷载、内水压力、管体自重和管内水重均参考文献[5-6]中的相关规定计算。

1.2 关键截面内力计算

采用结构力学分析方法进行内力计算,假设 BCCP 管身为均匀弹性介质,不考虑材料弹塑性引起的管体应力重分布。土荷载、管内水重以及管体自重的分布均服从 Olander 分布,如图 2 所示。假设管体基础包角为 90°,图 2 中管体底部均受到基础的支撑反力,具体的计算公式可参考文献[9]。

实际运行的 BCCP 在管长方向各部位受力基本相等,所以 BCCP 结构内力计算时可简化为单位管长横向截面的平面应变问题^[10]。将该截面看作是一个各种外荷载与基础反力共同作用下处于平衡状态的三次超静定环状结构,进一步简化,取半边结构进行分析,如图 3 所示。图 3(a)中 M_0 和 N_0 分别为管顶截面的弯矩和轴力,此时截面剪力为 0,图 3(b)中为与竖直方向成 θ 角的任意截面的内力,包括弯矩 M_θ 、轴力 N_θ 和剪力 Q_θ ,模型底部均为固定端约束。

不同的外荷载会使管壁截面受到不同的内力,总的内力即是土荷载、路面活荷载、内水压力、管体自重及管内水重对管壁截面产生内力的叠加。不同的管体基础支撑角会使各项外荷载对管壁截面产生不同的内力,任意截面的弯矩 M_θ 和轴力 N_θ 分别为

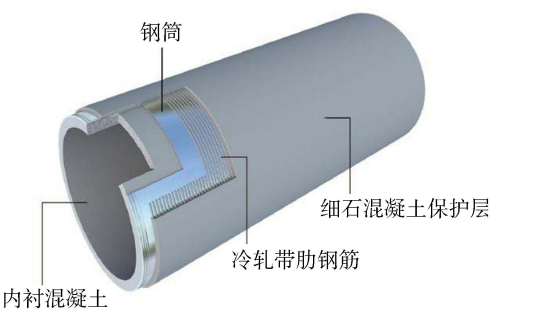


图 1 BCCP 结构示意图
Fig. 1 Structure diagram of BCCP

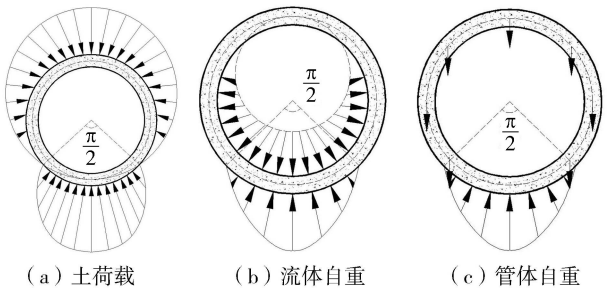


图 2 外荷载分布计算模型
Fig. 2 Calculation model of external load distribution

$$M_{\theta} = C_{mlx} W_x \bar{R} \quad N_{\theta} = C_{nlx} W_x \quad (1)$$

式中: C_{mlx} 、 C_{nlx} ——弯矩荷载作用系数、轴力作用系数,与管体基础支撑角有关,具体取值参考文献[5-6]; W_x ——各项外荷载,指土荷载、路面活荷载、内水压力、管体自重及管内水重; $\bar{R}$ ——管壁保护层中心半径。

1.3 预压应力计算

带钢筒的混凝土管芯由于缠绕了预应力钢筋会受到一个初始的预压应力,计算时假设管壁截面各部位的环向应力为均匀分布,通过钢筋受拉、混凝土和钢筒环向受压建立平衡方程,再根据变形协调就可以求得缠筋后管壁各部位的应力^[11]。

1.4 关键截面应力应变计算

在确定了 BCCP 运行条件下受到的各项外荷载后,将各项外荷载乘以不同的系数即可组成 BCCP 结构设计的各种荷载组合工况,一共设置 13 种不同的荷载组合工况。(a)基本荷载组合工况。 $W1: W_e+W_p+W_f+P_w$; $FW1: 1.25W_e+W_p+W_f$ 。(b)特殊荷载组合工况。 $WT1: W_e+W_p+W_f+P_w+P_t$; $WT2: W_e+W_p+W_f+W_t+P_w$; $WT3: W_e+W_p+W_f+W_t$; $FWT1: \beta_1(W_e+W_p+W_f+P_w+P_t)$; $FWT2: \beta_1(W_e+W_p+W_f+W_t+P_w)$; $FWT3: \beta_2(W_e+W_p+W_f+P_w+P_t)$; $FWT4: \beta_2(W_e+W_p+W_f+W_t+P_w)$; $FWT5: 1.6(W_e+W_p+W_f)+2.0W_t$; $FWT6: 1.6P_w+2.0P_t$ 。(c)水压试验组合工况。 $FT1: 1.1(W_e+W_p+W_f+P_{ft})$; $FT2: 1.1\beta_1(W_e+W_p+W_f+P_{ft})$ 。其中 W_e 为静荷载; W_p 为管体自重; W_f 为流体自重; W_t 为可变荷载; P_w 为工作压力; P_t 为瞬态内水压力; P_{ft} 为现场试验压力; β_1 为计算系数,对埋置式 BCCP 为 1.1, 对内衬式 BCCP 为 1.2; β_2 为计算系数,对埋置式 BCCP 为 1.3, 对内衬式 BCCP 为 1.4。

不同荷载组合工况下管壁截面的弯矩和轴力可根据图 3 模型计算得到,但是截面各部位的应力应变无法直接得出。取管顶、管底和管腰截面作为应力应变计算的关键控制截面,且主要以环向应力应变作为设计控制标准^[12-14],假设不同荷载组合工况下载面的应力应变都为线性分布,具体的计算步骤如下:

a. 设定一个管芯混凝土内壁受拉区边缘的应变系数 v_2 和一个管壁截面的应变分布斜率 k ,各部位的应力应变可以根据截面的线性几何关系得出。以管顶、管底截面应力应变计算为例,假设混凝土管芯内侧受拉,且内侧边缘的拉应变 ε_{ci} 为

$$\varepsilon_{ci} = (1 + v_2) \varepsilon'_i \quad (2)$$

式中: ε'_i ——管芯混凝土极限拉应力 f'_t 对应的极限拉应变。

受拉区的厚度与整个混凝土管芯的厚度比值为应变分布斜率 k ,则管芯受拉区厚度为 kh_c (h_c 为管芯厚度),受压区厚度为 $(1-k)h_c$,应变沿管壁截面呈线性分布,如图 4 所示。图 4 中 ε_{co} 为混凝土管芯外壁的应变; d_y 为钢筒位置距混凝土管芯内壁边缘的距离; ε_y 为钢筒应变; d_s 为钢筋直径; ε_s 为预应力钢筋应变; ε_{po} 为混凝土保护层外壁的应变; h_p 为细石混凝土保护层厚度。

混凝土本构模型采用双折线模型,分为 3 个区域:线弹性区、应力软化区(出现微裂缝)和开裂区(出现可见裂缝),如图 5 所示。BCCP 中管芯和保护层均采用混凝土浇筑,其本构关系相同,图中 $0.52\sqrt{f_{cu,k}}$ 为混凝土极限拉应力 $f_{cu,k}$ 为混凝土抗压强度标准值。

ε_{co} 、 ε_y 和 ε_s 可以根据图 4 中相应的几何关系求出^[5-6],BCCP 在管芯缠丝后浇筑厚度 50~60 mm 的混凝土保护层,需考虑对截面内力的贡献,则 ε_{po} 为按图 4 几何关系计算的应变值减去混凝土管芯缠筋后的平均应变值。

b. 根据计算的应力合成各部位的轴力和弯矩,将各部位的轴力和弯矩进行合成从而得到整个截面的轴力和弯矩。

c. 将此方法计算出的关键截面的轴力和弯矩与根据图 3 模型计算的不同组合工况下的关键截面的轴力和弯矩进行平衡,如果都能平衡则计算结束,如果不能平衡则返回步骤 a,设定新的 v_2 和 k 进行计算,直至轴力和弯矩都平衡。

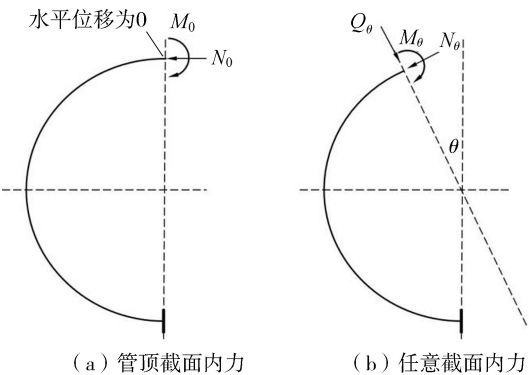


图3 内力计算简化模型示意图

Fig. 3 Diagram of simplified model for internet force calculation

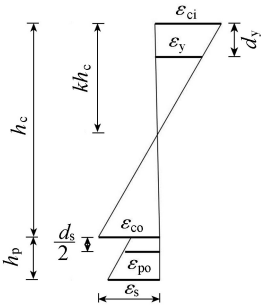


图4 管壁截面应变分布

Fig. 4 Strain distribution of pipe wall section

d. 根据平衡条件下的 v_2 和 k 即可求得关键截面各部位的应力应变。

2 设计准则

BCCP 设计时与 PCCP 一致,同样遵守工作极限状态设计准则、弹性极限状态设计准则和强度极限状态设计准则^[15],以埋置式 BCCP 为例,各项极限状态设计准则见表 1。

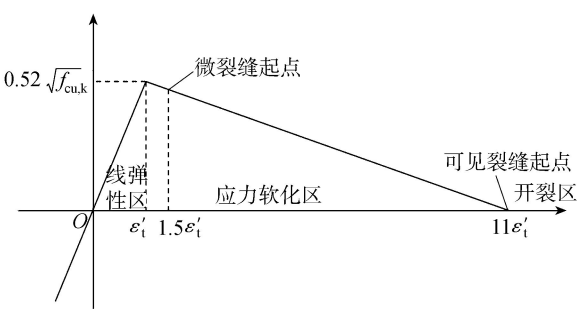


图 5 混凝土应力应变关系
Fig. 5 Stress-strain relationship of concrete

表 1 埋置式 BCCP 极限状态设计准则

极限状态和位置	荷载组合	目的	极限状态设计准则
整管工作极限	W1	为了防止管芯出现零应力为了 防止保护层开裂	压力: $P \leq P_0$
	WT1		压力极值: $P \leq \min(P'_k, 1.4P_0)$
管底/管顶工作极限	W1、WT1、WT2、FT1	为了防止管芯出现微裂缝	内层管芯极限拉应变: $\varepsilon_{ci} \leq 1.5\varepsilon'_t$
	FW1、WT3		管芯对薄钢筒径向极限拉力 $\sigma_r \leq 0.82 \text{ MPa}$
管侧工作极限	W1	为了防止管芯出现微裂缝及 控制保护层产生微裂缝	外侧管芯极限拉应变: $\varepsilon_{co} \leq 1.5\varepsilon'_t$
	W1		外侧保护层极限拉应变: $\varepsilon_{po} \leq 1.5\varepsilon'_t$
	WT1	为了防止保护层出现可见裂缝	外侧管芯极限拉应变: $\varepsilon_{co} \leq 11\varepsilon'_t$
	WT2、FT1		外侧保护层极限拉应变: $\varepsilon_{po} \leq 11\varepsilon'_t$
管底/管顶弹性极限	WT1、WT2、FT1	为了防止薄钢筒中的应力 超过极限	薄钢筒应力达屈服强度: $-f_{yr} + n'_r f_{cr} + f_y \leq f_{yy}$
	WT3		薄钢筒抗裂: $-f_{yr} + n'_r f_{cr} + f_y \leq 0$
管侧弹性极限	FWT1、FWT2、FT2	为了防止钢筋中的应力超过极限及 保持混凝土抗压强度低于 $0.75f'_c$	钢筋张拉控制应力 f_{sg} 加管芯混凝土抗压极限: $-f_{sr} + n_r f_{cr} + f_{sg} \leq f_{ci} \leq 0.75f'_c$
管侧强度极限	FWT3、FWT4	为了防止钢筋屈服	钢筋屈服强度设计值 f_{sy} : $-f_{sr} + n_r f_{cr} + f_{sg} \leq f_{sy}$
	FWT5	为了防止管芯开裂	极限弯矩: $M \leq M_{ult}$
开裂压力	FWT6	为了防止管件破坏	极限压力: $P \leq P_b$

注: P_0 和 P'_k 为抵消管芯最终预压应力所需的管子内水压力和最大极限压力; n_r 为制成后预应力钢筋与管芯混凝土的弹性模量比; n'_r 为制成后钢筋与管芯混凝土的弹性模量比; f_{cr} 、 f_{yr} 、 f_{sr} 分别为考虑预应力损失后的管芯、钢筒和钢筋的最终应力; f_{yy} 为钢筒抗拉屈服强度设计值; f_{sy} 为预应力钢筋屈服强度设计值,取 $0.85f_{su}$; f_{su} 为预应力钢筋抗拉强度标准值; M_{ult} 为管侧截面极限弯矩; P_b 为 BCCP 的计算开裂压力。相关参数的计算公式均可参考文献[5-6]。

工作极限状态指 BCCP 在某些荷载组合工况下,混凝土管芯和保护层不出现微裂缝或可见裂缝,即主要计算混凝土管芯和保护层表面拉应变,与图 5 所示的混凝土本构关系中出现微裂缝和可见裂缝的临界应变值 $1.5\varepsilon'_t$ 和 $11\varepsilon'_t$ 进行比较,计算结果大于该临界值,即不满足该设计准则,需重新调整各部位尺寸及预应力钢筋的直径、张拉应力和缠筋间距。

弹性极限状态指 BCCP 在某些荷载组合工况下欲开裂时,应具备足够的弹性以避免发生破坏或预应力损失,主要的设计对比指标为预应力钢筋拉应力、管芯混凝土压应力和钢筒的拉应力。

强度极限状态指 BCCP 在某些荷载组合工况下达到其最大承载能力时,混凝土管芯不发生压溃以及预应力钢筋不发生屈服断裂,即计算的预应力钢筋最大拉应力要小于其屈服强度。

3 实例应用

计算实例为宁夏盐环定泵站改造工程中实际使用的 BCCP 管型,工作内压为 1.0 MPa,管顶覆土高度为 2 m,路面活荷载为公路荷载,缠丝采用直径 10 mm 的 CRB650 钢筋,张拉控制应力 72%。几何尺寸:管道内径为 2 000 mm,管芯混凝土厚度为 180 mm,钢筒厚度为 2 mm,钢筒外径为 2 104 mm,保护层厚度为 60 mm,钢筋直径为 10 mm,缠筋间距为 20 mm。相关材料参数采用常规取值^[16-17],进行全工况的校核计算,对于开裂压力检验:极限状态准则为防止管子爆裂破坏,荷载组合为 FWT6,压力计算值为 2.40 MPa,准则极限值为 3.14 MPa,符合要求,其他工况计算结果见表 2~7。

表 2 整管工作极限状态检验

Table 2 Examination of working limit state of whole pipe

极限状态设计准则	荷载组合	内压力/MPa	准则极限值/MPa	是否符合
防止管芯出现零应力($P\leqslant P_0$)	W1	1.00	1.43	符合
防止保护层开裂($P\leqslant\min(P_k,1.4P_0)$)	WT1	1.40	2.00	符合

表 3 管顶、管底工作极限状态检验

Table 3 Examination of working limit state of pipe crest and bottom

荷载组合	极限状态设计准则	v_2	k	计算值	准则极限值	是否符合
W1	防止管芯出现微裂缝	-0.24	0.26	8.08×10^{-5}	1.59×10^{-4}	符合
FW1	防止管芯出现微裂缝	-0.42	0.11	-0.04 MPa	0.82 MPa	符合
WT1	防止管芯出现微裂缝	-0.32	0.41	7.16×10^{-5}	1.59×10^{-4}	符合
WT2	防止管芯出现微裂缝	-0.45	0.20	5.90×10^{-5}	1.59×10^{-4}	符合
FT1	防止管芯出现微裂缝	-0.37	0.34	6.79×10^{-5}	1.59×10^{-4}	符合
WT3	防止管芯出现微裂缝	-0.53	0.08	-0.06 MPa	0.82 MPa	符合

表 4 管顶、管底弹性极限状态检验

Table 4 Examination of elasticity limit state of pipe crest and bottom

荷载组合	极限状态设计准则	v_2	k	计算值/MPa	准则极限值/MPa	是否符合
WT1	防止钢筒应力达到极限	-0.24	0.42	-12.33	235.00	符合
WT2	防止钢筒应力达到极限	-0.48	0.19	-23.00	235.00	符合
FT1	防止钢筒应力达到极限	-0.29	0.36	-14.46	235.00	符合
WT3	防止钢筒受拉	-0.20	0.13	-37.41	0.00	符合

表 5 管侧工作极限状态检验

Table 5 Examination of working limit state of pipe side

荷载组合	极限状态设计准则	v_2	k	计算值	准则极限值	是否符合
W1	防止管芯出现微裂缝	1.03	0.24	9.55×10^{-5}	1.59×10^{-4}	符合
WT1	防止外管芯出现可见裂缝	0.22	0.23	4.27×10^{-4}	1.17×10^{-3}	符合
WT2	防止外管芯出现可见裂缝	0.23	0.21	4.76×10^{-4}	1.17×10^{-3}	符合
FT1	防止外管芯出现可见裂缝	0.66	0.20	6.79×10^{-4}	1.17×10^{-3}	符合
W1	防止保护层出现微裂缝	1.03	0.24	8.55×10^{-5}	1.59×10^{-4}	符合
WT1	防止保护层出现可见裂缝	0.22	0.23	4.78×10^{-4}	1.17×10^{-3}	符合
WT2	防止保护层出现可见裂缝	0.23	0.21	4.91×10^{-4}	1.17×10^{-3}	符合
FT1	防止保护层出现可见裂缝	0.66	0.20	4.87×10^{-4}	1.17×10^{-3}	符合

表 6 管侧弹性极限状态检验

Table 6 Examination of elasticity limit state of pipe side

荷载组合	极限状态设计准则	v_2	k	计算值/MPa	准则极限值/MPa	是否符合
FWT1	防止钢筋应力超过极限	0.00	0.22	401.51	468.00	符合
FWT2	防止钢筋应力超过极限	0.43	0.19	412.76	468.00	符合
FT2	防止钢筋应力超过极限	0.34	0.26	409.35	468.00	符合
FWT1	保持混凝土压应力低于设计值	0.00	0.22	12.81	37.50	符合
FWT2	保持混凝土压应力低于设计值	0.43	0.19	21.62	37.50	符合
FT2	保持混凝土压应力低于设计值	0.34	0.26	13.85	37.50	符合

表 7 管侧强度极限状态检验

Table 7 Examination of strength limit state of pipe side

荷载组合	极限状态设计准则	v_2	k	计算值/MPa	准则极限值/MPa	是否符合
防止钢筋屈服	FWT3	0.02	0.29	401.14	552.50	符合
防止钢筋屈服	FWT4	0.30	0.21	409.07	552.50	符合
防止管芯开裂	FWT5	7.52	0.83	34.87	156.98	符合

由表 2~7 可知,各个荷载组合工况下计算的相应判断指标都是合格的,即该 BCCP 管型的设计是安全的。另外,工程设计人员可以通过不断调整预应力钢筋的缠筋间距进行钢筋用量的优化,使设计出来的管型既安全又经济合理。

4 结 语

BCCP 结构设计过程中,外荷载、预压应力的计算和极限状态设计准则都可以参考 PCCP 的结构计算方法。内力计算时则将管截面看作是一个由各种外荷载与基础反力共同作用下处于平衡状态的三次超静定环状结构,给出了各个截面的弯矩和轴力计算公式;可采用迭代试算法计算管顶、管底和管腰等关键截面的应力应变。

该设计计算方法和设计准则除了可以用来根据实际工程需要设计 BCCP 的尺寸及缠筋参数,也可作为实际工程的安全评价依据。根据实际工程中的埋置参数和管道尺寸,复核 BCCP 的结构强度,给出实际运行过程中各种荷载组合工况下管顶、管底和管腰等关键截面的内力与应力应变,将计算结果与极限状态设计准则的条件进行对比校核,判断是否在安全范围内,给出安全评价结论。

参考文献:

[1] 胡少伟. PCCP 在我国的实践与面临问题的思考[J]. 中国水利,2017(18):25-29. (HU Shaowei. Considerations on practice and problems of PCCP in China[J]. China Water Resources, 2017(18):25-29. (in Chinese))

[2] HU Shaowei, SUN Yueyang, XUE Xiang, et al. Calculation model for bar-wrapping during prestressing of an embedded bar-wrapped cylinder concrete pressure pipe[J]. Thin Walled Structures, 2019,139: 39-45.

[3] 胡少伟,孙岳阳,薛翔,等. 预应力损失对 BCCP 管道安全性影响研究[J]. 人民长江, 2019,50(2):197-201. (HU Shaowei, SUN Yueyang, XUE Xiang, et al. Study on influence of prestress loss on safety of bar-wrapped cylinder concrete pressure pipe (BCCP)[J]. Yangtze River, 2019,50(2):197-201. (in Chinese))

[4] 胡少伟,薛翔,孙岳阳,等. 地基沉降对 BCCP 接口力学性能影响的试验研究[J]. 人民长江, 2018,49(11):91-96. (HU Shaowei, XUE Xiang, SUN Yueyang, et al. Experimental study on mechanical properties of BCCP joint under foundation settlement[J]. Yangtze River, 2018,49(11):91-96. (in Chinese))

[5] AWW Association. AWWA standard for design of prestressed concrete cylinder pipe:ANSI/AWWA C304-14[S]. Denver: American National Standards Institute, 2017.

[6] 中华人民共和国水利部. 预应力钢筒混凝土管道技术规范:SL702—2015 [S]. 北京:中国水利水电出版社,2015.

[7] 中国工程建设协会. 给水排水工程埋地预应力混凝土管和预应力钢筒混凝土管管道结构设计规程:CECS 140—2011 [S]. 北京:中国计划出版社,2011.

[8] 赵金涛,姚婷. 埋地塑料圆形管道环刚度计算[J]. 河海大学学报(自然科学版),2012,40(4):393-396. (ZHAO Jintao, YAO Ting. Calculation of ring-bending stiffness of buried round plastic pipeline[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2012,40(4):393-396. (in Chinese))

[9] 彭寿海. 超大口径预应力钢筒混凝土管(PCCP)结构分析[D]. 北京:清华大学,2009.

[10] SUN Yueyang, HU Shaowei, HUANG Yiqun, et al. Analytical stress model for embedded bar-wrapped cylinder concrete pressure pipe under internal load[J]. Thin-walled Structures, 2020,149:106540.

[11] 胡少伟,孙岳阳,薛翔,等. 预应力钢筒混凝土管(PCCP)承受负压能力分析[J]. 混凝土, 2018(8):18-21,26. (HU Shaowei, SUN Yueyang, XUE Xiang, et al. Capacity analysis of prestressed concrete cylinder pipe (PCCP) under negative pressure[J]. Concrete, 2018(8):18-21,26. (in Chinese))

[12] 窦铁生,程冰清,胡赫,等. 预应力钢筒混凝土管结构变形规律的原型试验研究 I:内压[J]. 水利学报, 2017, 48(12):1438-1446. (DOU Tiesheng, CHENG Bingqing, HU He, et al. The prototype test study of prestressed concrete cylinder pipe structure deformation law I. The internal pressure[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(12):1438-1446. (in Chinese))

[13] 窦铁生,程冰清,胡赫,等. 预应力钢筒混凝土管结构变形规律的原型试验研究 II:外压[J]. 水利学报,2018,49(2):207-215. (DOU Tiesheng, CHENG Bingqing, HU He, et al. The prototype test study of prestressed concrete cylinder pipe structure deformation law II. The external pressure[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018,49(2):207-215. (in Chinese))

[14] SUN Yueyang, HU Shaowei, HUANG Yiqun, et al. Analytical stress model for embedded bar-wrapped cylinder concrete pressure pipe under internal load[J]. Thin-walled Structures, 2020, 149:106540.

[15] 胡少伟,预应力钢筒混凝土管(PCCP)结构承载安全评价理论与实践[M]. 北京:中国水利水电出版社,2011.

[16] 孙岳阳,胡少伟,乔艳敏,等. BCCP 内水压承载能力原型试验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2020, 52(5):171-178. (SUN Yueyang, HU Shaowei, QIAO Yanmin, et al. Prototype test on the bearing capacity of BCCP under internal water pressure[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2020, 52(5):171-178. (in Chinese))

[17] 孙岳阳,胡少伟,范向前,等. BCCP 外压承载能力原型试验[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2020, 48(4):30-36. (SUN Yueyang, HU Shaowei, FAN Xiangqian, et al. Prototype test on the bearing capacity of BCCP under external load[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2020, 48(4):30-36. (in Chinese))