

DOI: 10.16285/j.rsm.2015.S1.050

软土地基上影响预应力钢筒混凝土管 相对转角关键因素研究

孙立强^{1,2}, 张京京^{1,2}, 李 恒³, 闫澍旺^{1,2}, 霍知亮^{1,2}

(1. 天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072; 2. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300072;
3. 青岛高新技术开发区工程质量与安全监督站, 山东 青岛 266109)

摘 要: 预应力钢筒混凝土输水管(PCCP)已广泛应用于地下输水工程, 特别是南水北调工程。管道接口属于半刚性结构, 相邻管道可产生一定的自由转角, 在自由转角范围内两管之间不会产生内力。当相对转角大于自由转角时, 两管会产生相互作用力, 作用力过大会导致 PCCP 管的破坏, 如何有效地控制不均匀软土地基上相邻管道转角成为研究管道安全的关键问题之一。首先分析了导致 PCCP 管线产生相对转角的机制, 结合现场试验和数值分析对控制 PCCP 管线相对转角的关键因素进行研究。研究表明, 相对转角的敏感因素为管道底部碎石垫层厚度、腰部以下砂垫层(砂包角)厚度和压实度, 随着碎石垫层厚度增大、砂垫层(砂包角)厚度和压实度增加, 管线相对转角降低, 通过控制这 3 个因素可有效控制 PCCP 管的相对转角。研究成果可为软土地基上 PCCP 输水工程设计提供依据和指导。

关 键 词: 软土地基; 预应力钢筒混凝土管(PCCP); 自由转角; 施工工艺

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2015)增1-0293-06

Research on key factors influencing relative angle of prestressed concrete cylinder pipe in soft soil foundation

SUN Li-Qiang^{1,2}, ZHANG Jing-Jing^{1,2}, LI Heng³, YAN Shu-wang^{1,2}, HUO Zhi-liang^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

3. The Engineering Quality and Safety Surveillance of Qingdao High-tech Development Zone, Qingdao, Shandong 266109, China)

Abstract: The prestressed concrete cylinder pipe(PCCP) has been widely used in underground water conveyance projects, especially in the south-to-north water diversion project. Pipeline interface belongs to the semi-rigid structure; while the relative angle of adjacent PCCP is larger than the allowable angle, PCCP will produce internal force in bell and spigot. However, if it is located in the serious uneven soft soil foundation, it may produce excessive angle and even destroyed. Therefore, how to control the PCCP produce excessive angle in soft soil foundation becomes one of the key issues in researching pipeline safety. Firstly, what factors lead to relative angle is analyzed. Then combined with field test and numerical analysis, the key factors for control PCCP angle is determined. Research results show that the thickness of the gravel cushion, the thickness and compactness of the sand cushion are the most important factors to control excessive angle. As the thickness of the gravel cushion, the thickness and compactness of the sand cushion increase, the relative angles decrease. The research results can provide basis and guidance for PCCP pipeline engineering design in soft soil foundations.

Keywords: soft soil foundation; prestressed concrete cylinder pipe(PCCP); allowable angle; construction technology

1 引 言

预应力钢筒混凝土管(prestressed concrete cylinder pipe, 简称 PCCP)如图 1 所示, 是在带钢筒

的混凝土管芯上环向缠绕预应力钢丝, 外部施喷水泥砂浆保护层而制成, 兼备钢管的抗拉、抗渗性能和混凝土管的抗压、耐腐蚀性等诸多优点, 一问世就显示出其强大的生命力。PCCP 发展至今已经成

收稿日期: 2015-03-09

基金项目: 国家自然科学基金(No.41402263); 天津市自然科学基金重点项目(No.13JCZDJC35300); 教育部新教师基金(No.20130032120053)。

第一作者简介: 孙立强, 男, 1979 年, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事岩土工程方面的研究。E-mail: slq0532@126.com

通讯作者: 张京京, 女, 1989 年, 博士研究生, 主要从事软土地基处理及土动力学方面的研究。E-mail: zhangjj0305@163.com

为长距离、大口径有压输水管线的首选管材,在国内外得到广泛应用。PCCP 接口属于半刚性结构,自由转角可高达 1.5° ,在外力作用下两相邻管段在自由转角范围内转动而不产生刚性约束,即不传递弯矩,对软土地基的适应能力较强。当地质条件为软土地基,且多遇鱼塘、淤泥质黏土等不良土层时,相邻管线易于产生不均匀沉降。当两管的相对转角超过自由转角时,承插口处会产生内力,严重时会出现破裂现象,同时承插口的胶圈也有可能被挤出,导致接口处发生漏水事故。因此,只有将管道转角控制在允许值范围内,软土地基上 PCCP 管线的安全运行才能得到保障。

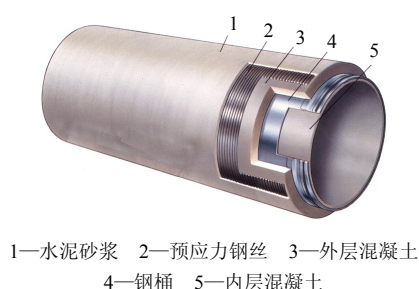


图 1 PCCP 结构图

Fig.1 Structure chart of prestressed concrete cylinder pipe

目前国外对 PCCP 输水管线的研究主要集中在使用过程中的评估管理技术^[1]、声波监测技术^[2]、维修与维护技术^[3-4]等方面,在施工工艺方面的研究还比较少。Bardakjian 等^[5]介绍了美国两个软土地基输水管线成功应用的案例,通过改变 PCCP 材料实现了对软土地基的适应性。国内专家也针对软土地基上 PCCP 的使用展开了研究,顾永明^[6]全面总结了软土地基 PCCP 安装的难题,指出管道转角过大是 PCCP 使用之大忌。可以通过加强地基处理控制管道转角,例如,采用搅拌桩或 CFG 桩处理或在管道腰部以下浇筑混凝土约束管道水平位移^[7]。这些方法工程造价较高,长距离的输水工程会造成巨大的经济浪费,如何采用经济有效的方法控制过大的相对转角尚需进一步研究。

本文基于一种经济简单的 PCCP 管线工程的施工工艺,首先分析了 PCCP 管线相对转角产生的影响因素,结合现场试验和数值分析的手段对各影响因素进行研究,提出影响相对转角的敏感因素,提出了相应的控制措施。

2 PCCP 转角产生机制及计算方法

2.1 转角产生机制

相邻 PCCP 管的转角是两管的不均匀位移产生

的,而不均匀位移是由于土质不均匀、荷载不均匀或水平约束条件不均匀导致,如图 2 所示(图中 E 为模量。PCCP 管线产生的位移可分为上浮位移、竖向沉降位移和水平位移。

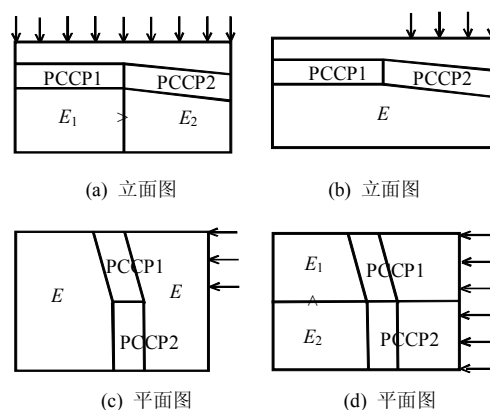


图 2 转角产生机制示意图

Fig.2 Sketches of angle generation mechanism

(1) 上浮位移

管道铺设完成后,地下水位的回升会导致 PCCP 管受到向上的浮力,如果上部回填土厚度或上覆荷载分布不均匀, PCCP 管线会产生不同的上浮位移。不均匀的上浮位移会导致管线产生一定的相对转角。管道运营期骤然停水时相当于卸荷, PCCP 管线也会产生一定的上浮位移。

(2) 竖向沉降位移

相邻管道的不均匀沉降分为两种情况,一种是相邻管道上部荷载相同但是铺设在不均匀的地基上,导致管线在相同上覆荷载作用下产生不均匀沉降,见图 2(a)。另一种是,地基土均质但管道上覆土厚度不同或上覆荷载不同导致地基土的不均匀沉降,见图 2(b)。当相邻 PCCP 管道产生不均匀沉降时两管会产生相对转角,因此地基处理方式是影响相对转角的主要因素之一。

(3) 水平位移

当 PCCP 管线两侧存在不同的荷载时,管道会受到不同的侧向土压力,导致管线产生不均匀水平位移,见图 2(c)。当管道腰部以下砂垫层的压实度不同时,相邻管道也会产生不均匀的水平位移,见图 2(d)。不均匀的水平位移会导致相邻管道产生相对转角,因此砂垫层的厚度和压实度也是控制 PCCP 管道相对转角的因素。

2.2 自由转角计算方法

PCCP 管自由转角与两管接缝宽度、承插口配合间隙相关^[8]。基于管道搭接设计原理,提出管道

接缝和自由转角的关系、承插口配合间隙与自由转角的关系。

(1) 接缝宽度与自由转角的关系

接缝宽度与自由转角关系示意图如图 3 所示。

最大自由转角 θ_0 为

$$\sin(\theta_0 / 2) = \Delta / 2D \quad (1)$$

式中： D 为管道外径； Δ 为接缝宽度。对式 (1) 进行变换，则

$$\theta_0 = 2 \arcsin(\Delta / 2D) \quad (2)$$

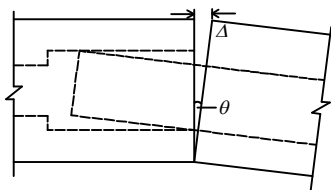


图 3 接缝宽度示意图
Fig.3 Sketch of joint width

根据式 (2) 的计算方法，在 PCCP 管现场检测时通过测量管道内部上、下、左、右 4 个位置的缝宽，即可计算出管道的水平转角及竖向转角。

(2) 承插口配合间隙与自由转角的关系

管道相对转动需要插口外径与承口内径有足够间隙，并且与插入长度相关，如图 4 所示。不考虑管道弯曲，插入长度为 l_0 ，当转角达到自由转角 θ_0 时管道间隙可由式 (3) 计算。

$$\Delta d = l_0 \sin \theta_0 \quad (3)$$

式中： Δd 为承插口配合间隙。

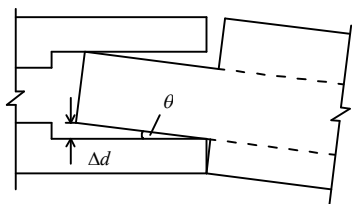


图 4 承插口配合间隙示意图
Fig.4 Sketch of fit clearance between bell and spigot

3 PCCP 管线施工工艺及现场试验

南水北调中线天津市配套工程某段沿线多为粉黏或黏土地基，穿越鱼塘遇到淤泥质黏土，土质不均匀。结合该工程进行现场试验，对影响 PCCP 管线相对转角的因素进行研究。

3.1 施工工艺简介

根据 PCCP 管道的施工过程，其施工工艺为基

底处理、管道安装、回填砂包角垫层和上部回填土施工 4 个步骤。施工流程、施工工艺分别如图 5、图 6 所示。

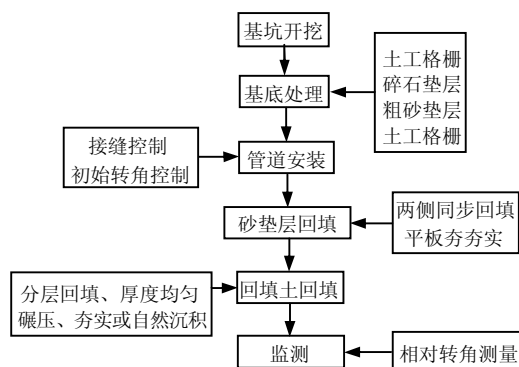


图 5 施工流程
Fig.5 Construction process

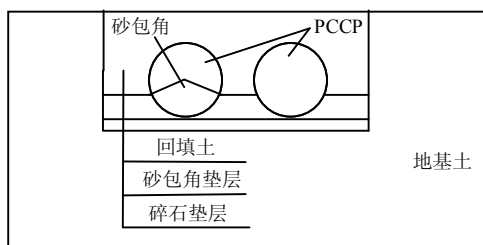


图 6 施工工艺
Fig.6 Construction technology

3.2 试验方案及试验过程

在天然地基与鱼塘过渡区域选取 2 个地质条件相似的试验段，采用同一施工工艺的两种不同工况进行施工。施工现场见图 7，工况参数见表 1。

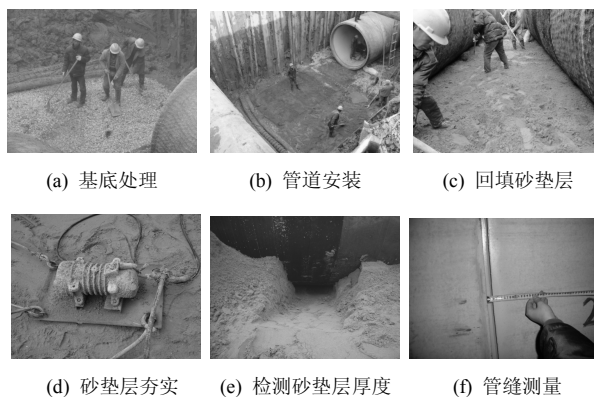


图 7 施工现场
Fig.7 Construction site

表 1 工况参数
Table 1 Construction parameters

试验段	碎石垫层 厚度/cm	粗砂找平 厚度/cm	砂包角 度/(°)	砂垫层 厚度/cm	砂垫层 压实度	回填土 压实度
工况 1	15	20	110	50	0.8	0.8
工况 2	20	20	120	70	0.85	0.8

3.3 现场监测结果

施工完成后测量管线的竖向位移,当位移稳定后测量相邻管线的接口间隙,根据转角计算方法计算相对转角。监测结果见表 2。

表 2 现场试验段转角监测结果

Table 2 Monitoring results of construction site

工况 1			工况 2		
管道 编号	水平转角 /(°)	竖向转角 /(°)	管道 编号	水平转角 /(°)	竖向转角 /(°)
033~034	0.2	0.3	189~190	0.10	0.2
089~090	0.5	0.5	051~052	0.10	0.5
132~133	0.6	1.2	199~200	0.10	0.1
166~167	0.9	0.7	033~034	0.04	0.4
185~186	0.4	1.3	178~179	0.40	0.7
191~192	0.0	0.6	007~008	0.10	0.3

由监测数据可知,在工况 1 施工条件下水平转角最大值为 0.9° ,竖向转角最大值为 $1.2^\circ \sim 1.3^\circ$ 。然而,在工况 2 施工条件下,通过增加碎石垫层厚度以及砂包角厚度和压实度,将最大水平转角控制在 0.4° 以内,最大竖向转角控制在 0.7° 以内。因此,工况 2 较工况 1 对相对转角的控制更加有效,并且采用工况 2 时水平转角得到良好的控制。试验表明,当管道沿线地基土体分布不均匀时,增加碎石垫层厚度可以控制管线竖向转角;砂包角与管道底部无缝连接,起到固定和约束管道转动的作用,增加砂包角的厚度和密实度对管道水平转角约束作用显著。

4 数值分析

为了研究不同因素对相对转角的影响,受现场试验条件和经费所限,采用数值方法对控制管线竖向转角的敏感因素进行分析。采用验证的数值模型分别对不同碎石垫层厚度、不同砂垫层压实度和回填土压实度情况下的相对转角进行计算,最终给出相对转角与碎石垫层厚度、砂垫层压实度和回填土压实度之间的关系。

4.1 模型验证

(1) 模型建立

采用 ABAQUS 软件结合现场试验段建立有限元计算模型^[9],地基模型长×宽×高分别为 $50\text{ m} \times 20\text{ m} \times 20\text{ m}$,基坑开挖宽度、深度分别为 7.5 m 、 6.0 m 。有限元计算模型如图 8 所示,包括八根 PCCP 管道、地基土体、碎石垫层、土工格栅、砂包角砂垫层和回填土。

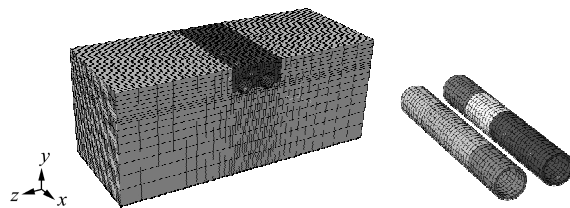


图 8 有限元计算模型

Fig.8 FEM model

(2) 计算参数

有限元计算模型建立在不均匀土地基上(天然地基和鱼塘回填地基的过渡段),中间 2 根管道下方为鱼塘地基,两端管道下方为天然地基。本文主要研究不同影响因素下自由转角的大小,因此在插口和承口之间建立无摩擦接触并允许自由的相对转动。

PCCP 结构尺寸及计算参数见表 3、4,采用理想弹性模型,与土体之间建立库仑摩擦接触,其摩擦因数为 0.2。

表 3 PCCP 结构尺寸

Table 3 Structural dimensions of PCCP

名称	尺寸/mm
管道内径	2 400
管道外径	2 774
钢桶厚度	2

表 4 PCCP 计算参数

Table 4 Calculating parameters of PCCP

结构单元	密度/(kg/m ³)	弹性模量/GPa	泊松比
PCCP 钢筒	7 850	210	0.3
混凝土芯	2 500	34.5	0.2

通过现场取土进行室内相关试验,得到地基土体、碎石垫层、砂垫层和回填土的物理力学指标,见表 5~8。土体采用 Mohr-Coulomb 弹塑性本构模型。

表 5 地基土计算参数

Table 5 Calculating parameters of foundation soil

名称	密度 /(g/cm ³)	压缩模量 /MPa	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /(°)
天然地基	1.85	4.5	13	15
鱼塘	1.70	2.4	12	5

表 6 碎石垫层计算参数

Table 6 Calculating parameters of gravel cushion

土质	密度 /(g/cm ³)	弹性模量 /MPa	泊松比	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /(°)
碎石	2.20	120.00	0.28		
细砂	1.67	30.47	0.30	0	36

表 7 砂垫层计算参数

Table 7 Calculating parameters of sand cushion

压实度	干密度 /(g/cm ³)	弹性模量 /MPa	内摩擦角 /(°)
0.70	1.39	19.06	30.96
0.75	1.47	22.12	31.45
0.80	1.57	26.55	32.09
0.85	1.67	29.47	33.39
0.90	1.77	40.69	37.58
0.95	1.87	47.24	39.99

表 8 回填土计算参数

Table 8 Calculating parameters of backfilled soil

压实度	干密度 /(g/cm ³)	弹性模量 /MPa	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /(°)
0.70	1.30	10.55	8.39	10.58
0.75	1.47	11.10	8.63	11.15
0.80	1.57	12.50	10.67	14.45
0.85	1.67	15.25	12.70	16.44
0.90	1.77	20.50	17.50	20.80

(3) 数值计算结果与实测结果对比

为了验证数值计算方法的可行性，首先对现场试验进行模拟计算，修正计算模型。两种工况计算参数分别参照表 5~8 选取。工况 1 水平位移云图如图 9 所示。由中间两管的水平位移可以计算出相对转角。

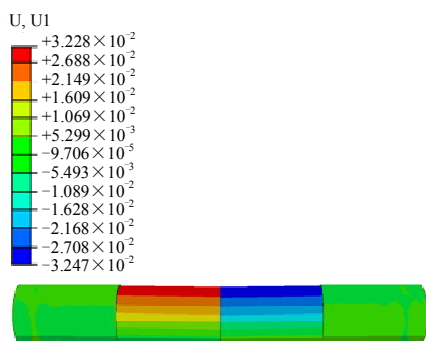


图 9 工况 1 水平位移云图 (单位: m)

Fig.9 Nephogram of horizontal displacements of construction condition 1(unit: m)

表 9 为转角计算值与实测值对比结果，实测值为现场两种工况对应的最大竖向转角。管道转角的计算值与实测值相近，数值模拟最大误差不超过 0.02°，计算模型可靠。

表 9 转角数值计算值与实测值对比结果

Table 9 Angle comparison between calculated and measured values

工况	转角计算值/(°)	转角实测值/(°)
1	1.28	1.3
2	0.69	0.7

4.2 相对转角随不同影响因素的变化规律

数值计算中以工况 2 施工条件为基准，分别对碎石垫层铺设厚度、砂垫层压实度和回填土压实度 3 个影响管线转角的关键因素进行分析，同时考虑施工期和通水期（考虑运营期通水荷载的影响）两种情况管线转角，提出影响 PCCP 转角的敏感因素。

(1) 碎石垫层厚度对转角的影响

取碎石垫层分别为 5、10、15、20、25 cm 进行数值计算，得到转角与碎石垫层厚度关系曲线如图 10 所示。从图中可以看出，管道转角随着碎石垫层厚度的增加逐渐减小，通水期碎石垫层厚度仅有 5 cm 时，转角达到 1.39°；在碎石垫层厚度达到 20 cm 时，转角降低至 0.68°，降幅为 0.71°；碎石垫层厚度增大到 25 cm 时，转角较 20 cm 厚略有降低，降幅仅有 0.05°。

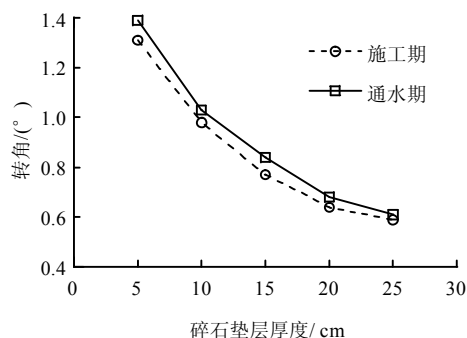


图 10 转角与碎石垫层厚度关系曲线

Fig.10 Relationships between angle and gravel cushion thickness

由数值分析可知，增加碎石垫层厚度能够有效地减小管线相对转角，有利于上覆应力扩散，能更加充分地发挥硬壳层的作用。但是，当碎石垫层厚度达到一定值后，随碎石垫层厚度的增加，相对转角降低幅度大大降低。

(2) 砂垫层压实度对转角的影响

在数值计算模型中，砂垫层压实度分别取 0.70、0.75、0.80、0.85、0.90、0.95 进行分析，计算参数见表 7。转角与砂垫层压实度关系曲线如图 11 所示。由计算结果可知，砂垫层压实度越大管道转角越小。当压实度为 0.7 时，通水期转角高达 1.2°；当砂垫层的压实度超过 0.8 后，管道转角显著减小，得到有效控制。

综上所述，铺设密实的砂垫层对管道的位移有明显的约束作用，从而减小管道相对转角。

(3) 回填土压实度对转角的影响

采用相同的方法，对回填土压实度分别为 0.70、0.75、0.80、0.85、0.90 五种情况进行数值计算，计

算参数见表 8。转角与回填土压实度关系曲线如图 12 所示。回填土压实度的提高对管线转角影响很小, 压实度由 0.7 提高到 0.9 时, 通水期转角仅降低 0.12° 。

在软土地基上, 腰部以上回填土的压实度对控制管道转角的作用相对较小。

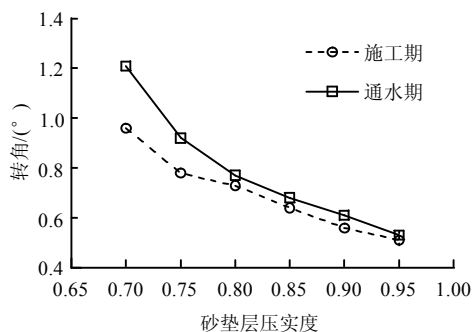


图 11 转角与砂垫层压实度关系曲线

Fig.11 Relationships between angle and sand cushion compactness

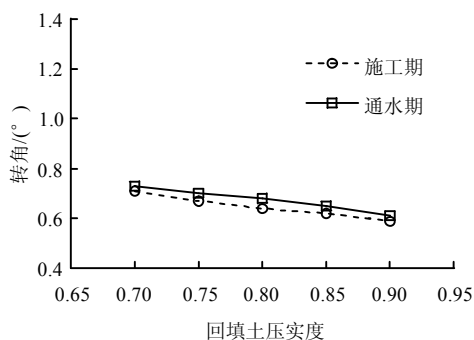


图 12 转角与回填土压实度关系曲线

Fig.12 Relationships between angle and backfilled soil compactness

5 结 论

(1) PCCP 管段之间相对转角的产生是由两管土质不均匀或荷载不均匀而造成的差异变形, 表现为不均匀沉降和不均匀水平位移。

(2) 碎石垫层厚度、砂垫层(砂包角)厚度和压实度是控制管道转角大小的关键因素, 通过控制

上述因素可有效地控制相邻管道的相对转角。

参 考 文 献

- [1] MERGELAS B J, ATHERTON D L, KONYALIAN R, et al. Managing the risk in operating PCCP pipelines[J]. *Bridges*, 2001, 10(40574): 37—37.
- [2] BELL G E C, PAULSON P. Measurement and analysis of pccp wire breaks, slips and delaminations[C]//Climbing New Peaks to Infrastructure Reliability, Renew, Rehab, and Reinvest. New York: ASCE, 2010:1016—1024.
- [3] PRIDMORE A B, CAUGHLIN D. Metropolitan utilities district of omaha PCCP asset management advancements[J]. *Bridges*, 2014, 10: 1408—1417.
- [4] JOHNSON J K, HUTSON A C, GIBSON R L, et al. Protecting existing pccp subject to external transient loads[C]//Climbing New Peaks to Infrastructure Reliability, Renew, Rehab, and Reinvest. New York: ASCE, 2010: 203—210.
- [5] BARDAKJIAN H, MURPHY M. Two successful installations of large diameter rigid-design concrete pressure pipelines in very soft soils[C]// Innovations in Design, Construction, Operations, and Maintenance, Doing More with Less. New York: ASCE, 2012: 644—654.
- [6] 顾永明. 大口径 PCCP 给水钢砼管在软土地基中的应用[J]. *中国高新技术企业*, 2009, 15(1): 137—138.
- [7] 温晓英, 程子悦, 郭晓光. 大口径 PCCP 在软土地基中的应用[J]. *中国给水排水*, 2012, 28(2): 1—4, 13.
- [8] 宁靖华, 崔卫祥, 王乃锋. 预应力钢筒混凝土管接头允许相对转角的计算[J]. *混凝土与水泥制品*, 2005, 32(4): 23—25.
- [9] 石亦平, 周玉蓉. ABAQUS 有限元实例详解[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.