

地基不均匀沉降下大型 PCCP 力学响应机理分析

陈博智, 冯新, 赵琳, 周晶

(大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116023)

摘要: 不良的地基条件会大大加速预应力钢筒混凝土管(PCCP)的结构退化进程, 缩短管道服役寿命。为研究地基不均匀沉降下大型 PCCP 的响应特征及破坏模式, 笔者基于 ABAQUS 软件建立了三维非线性有限元分析模型, 考虑了管土及管节接头间的相互作用。通过模拟不同的地基不均匀沉降量, 研究了内外荷载联合作用下 PCCP 的力学响应机理, 分析和总结了 PCCP 的转角响应特点、管芯的应变分布与发展规律以及承插口结构的破坏模式。研究表明, 地基不均匀沉降对管道承插口结构受力特征影响显著, 对管身影响很小; 沿管线 40 m 范围内当地基沉降差达到 35 cm 时, 管节间最大相对转角超过了设计规程限值(0.5°); 相对转角过大导致承插口结构受到显著的弯曲或挤压作用, 产生微裂缝区域, 外界腐蚀性物质侵入管壁内部, 加速了 PCCP 结构性能的退化。

关键词: 预应力钢筒混凝土管; 地基不均匀沉降; 力学响应机理; 相对转角; 承插口破坏

中图分类号: TU 990.3 文献标志码: B 文章编号: 1009-7767(2018)06-0147-06

Mechanism Analysis of Mechanical Response of Large PCCP at Uneven Base Settlement

Chen Bozhi, Feng Xin, Zhao Lin, Zhou Jing

近些年, 预应力钢筒混凝土管(PCCP)在国内外众多长距离压力输水工程中得到了广泛的应用, 但在实际工程中, PCCP 出现了诸如裂缝、断丝、保护层剥落等结构病害情况。目前针对 PCCP 的研究大多仅仅针对 PCCP 结构本身, 管道与地基相互作用方面的研究还不够完善。研究表明, 不同地基条件对 PCCP 在内外荷载作用下的响应影响显著^[1], 而不良地基条件则会大大加速管道结构的退化进程, 缩短管道服役寿命^[2-3]。

针对软土地基上 PCCP 结构响应的研究, 孙瑞花^[4]通过有限元方法对 PCCP 管节间自由转角达到最大值后管节继续转动直到管道破坏的过程进行了分析; 王成华等^[5]采用有限元方法分析了土性、管道刚度、碎石垫层厚度等参数的变化对管道沉降性状的影响, 并提出了一些减小地基不均匀沉降的措施; 孙立强等^[6]结合现场试验和数值分析对影响 PCCP 相对转角的关键因素进行了研究。分析文献可以发现, 现有的研究存在以下 3 个方面的不足之处: 1) 有限元分析模型中所建立的管线长度较短, 最多只包含 4 个管节, 无法全面反映地基不均匀沉降对 PCCP 的真实影响范围和大小; 2) 研究者大多仅关注地基不均匀沉降下 PCCP 的沉降

或转角特性, 而很少关注 PCCP 的混凝土管芯结构, 没有进一步分析这些不同的沉降或转角特性会对 PCCP 的管芯应力变形特性及损伤特征造成何种影响; 3) 现有的有限元分析模型大多没有考虑管节承插口之间的接触关系, 导致分析结果与实际情况不完全符合。

笔者以有限元分析为主要研究方法, 通过试算确定地基不均匀沉降的影响范围, 并建立地基不均匀沉降下 PCCP 结构的三维非线性有限元分析模型。通过模拟 2 种不同的地基条件, 对不同的不均匀沉降量进行分析, 研究在内外荷载联合作用下 PCCP 的转角响应特点、管芯的应变分布与发展规律、承插口结构的破坏模式, 为工程实践中地基不均匀沉降下 PCCP 的结构状态评价及失效风险分析提供理论依据。

1 有限元分析模型

1.1 模型建立

基于 ABAQUS 有限元软件建立分析模型, 模型中采用 2 种不同性质的土体来模拟地基的不均匀沉降。以沉降分界面为中心, 距离越远的管节, 其相对转角受到沉降差的影响越小, 直至可以忽略不计。为节约计算成本, 笔者通过建立等效简化模型, 确定沉降差的影响

范围以及合理的管线分析长度,再按照 PCCP 的真实结构进行建模和分析。等效简化模型计算结果显示,以沉降分界面为中心,选取 8 个管节(40 m)作为分析长度,并在端部管节的端面施加法向位移约束,能够较真实全面地反映出地基不均匀沉降下 PCCP 的响应特征。

研究采用的 PCCP 设计内径为 3 800 mm,设计内压为 0.6 MPa,设计埋深为 2.5 m。单层缠丝,缠丝螺距为 14.1 mm,管壁厚度为 327 mm,单节管长为 5 m。预应力钢丝、钢筒、混凝土和砂浆的基本参数如表 1 所示。中国的 PCCP 结构设计规程采用线弹性设计方法^[7],为考虑钢材的屈服以及混凝土开裂等材料非线性特征,管身材料的本构关系采用美国 AWWA C304 标准^[8]推荐的模型。

土体的建模范围为自管底向下 3D 以及自管中心向两侧 4.5D,土体的底部施加全约束,四周施加法向约束,顶面不施加约束,2 种地基以及回填土的参数如表 1 所示。沉降分界面设置在模型的中间,一侧地基为天然地基,另一侧地基为软土地基,如图 1 所示,2 种地基上各有 4 个 PCCP 管节。PCCP 采用分离式建模方法^[9-10],管土接触关系采用库伦摩擦模型,摩擦系数为 0.2^[6,11]。只考虑管节间的强制转角,承插口间的接触关系采用库伦摩擦模型,由于管节接头处存在钢与混凝土、混凝土与混凝土等多种摩擦关系,结合文献[12]、[13]综合考虑,摩擦系数取 0.7,接触面范围为承口和插口的整个端面。

表 1 材料基本参数

材料	密度/(kg/m ³)	弹性模量/MPa	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	泊松比
钢丝	7 833	205 000	1 570	1 570	0.3
混凝土	2 500	35 500	35.5	2.74	0.2
钢筒	7 833	206 000	235	235	0.3
砂浆	2 200	24 165	45	3.49	0.2
天然地基	1 850	4.5			0.3
软土地基	1 700	2.4			0.3
回填土	1 770	10.55			0.3

包含土体的模型尺寸为 40 m×40 m×20 m,混凝土、砂浆和土体使用 C3D8R 实体单元离散,钢筒和承插口钢板使用 S4R 壳单元离散,预应力钢丝使用 T3D2 杆单元离散,整个模型共离散为 551 040 个单元和 607 362 个节点,采用降温法对 PCCP 施加预应力。离散后的有限元模型如图 2 所示。

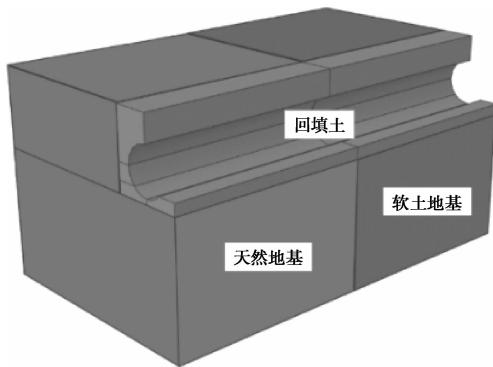


图 1 2 种地基示意图

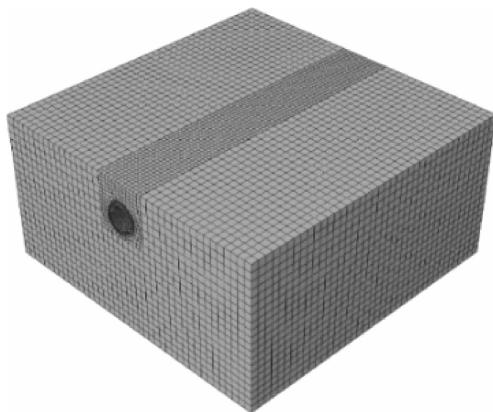


图 2 离散后的有限元分析模型

1.2 工况

将沉降差设置为主要研究变量,通过对地基施加不均匀的基底附加压力实现不均匀沉降的模拟,共设置了 9 个工况。这里需要说明,所采用的基底附加压力大小来自人为假定,与实际情况并不完全对应。该假定基于以下 3 点考虑:1)真实的地基沉降量需在实际工程中根据试验或监测确定,但目前从公开发表的文献中尚难得到 PCCP 沉降方面的实测数据;2)实际工程中管线地基受到多方面的共同作用(徐变、塌陷、软弱夹层、地下水冲刷等),其真实沉降量较线弹性模型在上覆土荷载作用下计算得到的地基沉降量更大;3)研究的主要目的是分析 PCCP 结构在地基不均匀沉降下的响应机理与极限条件下的破坏模式,因此需要设置较大的沉降差以模拟 PCCP 的极限破坏情况。

实际工程中,局部管线安装完成后,并不马上投入使用,因此在研究中,分别考虑不均匀沉降发生在管线完建期和运行期 2 种情况,其中完建期管线上的荷载为管道自重和回填土作用,运行期则加上管内水重和工作内压(0.6 MPa)。计算得到各工况下的地基沉降

差如表 2 所示,表中所统计的沉降差指沿管轴线方向相距 40 m 的管底下部土中两点的竖向位移之差。

表 2 各工况下的地基沉降差

工况	1	2	3	4	5	6	7	8	9
沉降差/cm	7.9	15.2	21.1	23.7	29.1	34.8	41.3	48.1	65.9

2 PCCP 力学响应机理

以下分别对 9 个工况下 PCCP 的有限元模拟结果进行分析。为方便叙述,将模型中的 PCCP 管节与接头

分别编号,如图 3 所示。

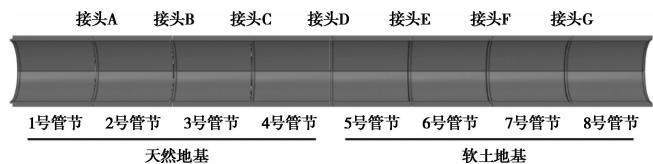


图 3 管节及接头编号

2.1 管节间相对转角

将各接头处管节间相对转角绘于图 4。

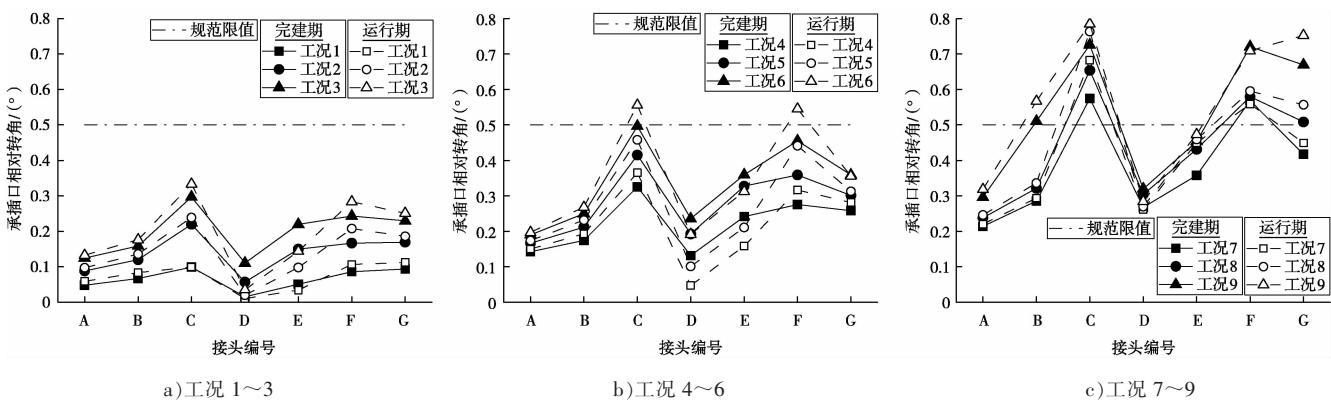


图 4 承插口相对转角

从图 4 可以看出,7 个接头中,接头 D 的相对转角较小,这是由于接头 D 正好坐落在地基土体性质改变的交界面上,左右两侧管节的绝对转角均较大;接头 C、F 的相对转角较大,说明这 2 个接头的承插口结构处于更为不利的受力状态,因此有必要详细分析这 2 个典型接头的力学响应机理。随着沉降差的增大,各接头处管节间相对转角逐渐增大,CJJ 224—2014《城镇给水预应力钢筒混凝土管管道工程技术规程》^[14]规定相对转角不得超过 0.5°,而工况 6 的沉降差达到 34.8 cm,若沉降发生在完建期,则接头 C、F 的相对转角分别为 0.50° 和 0.46°,已达到或接近规程的限值;同工况下若沉降发生在运行期,则接头 C、F 的相对转角分别为 0.56° 和 0.55°,均已超过规程限值。当沉降差继续增大到 65.9 cm 时,接头 B、C、F、G 的相对转角均超过 0.5°,其中接头 C 的相对转角最大,达到 0.78°,此时管线已不能按照规程要求正常工作。

2.2 管芯的应变分布与发展

图 5 所示为沉降发生在完建期的最大主应变分布。

从图 5 可以看出,承插口附近受到的挤压和弯曲作用较为明显,应变较大区域在管道内侧沿环向呈带状分布,对应的管道外侧区域应变则较小。左侧接头

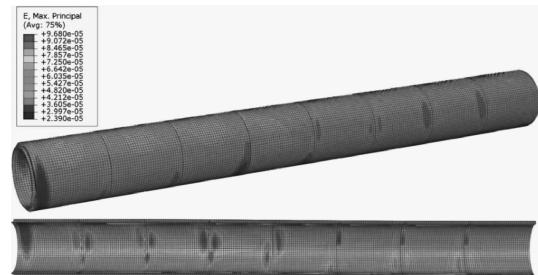


图 5 混凝土管芯最大主应变云图(工况 2)

A、B、C 的应变分布规律类似,即承口端管芯外侧管腰至管底区域应变较小,插口端管腰内侧应变较大,另外,在距离插口端面和承口端面约 50 cm 的管芯内侧 10 点钟方向应变较大。右侧接头 E、F、G 的应变分布规律类似,由于相对转角方向相反,因此整体的应变分布与左侧呈现上下镜像的特点。当沉降发生在运行期时,管线最大主应变分布规律与完建期基本一致。工况 2 下整个管线最大主应变为 97×10^{-6} ,小于美国 AWWA C304 标准规定的管芯混凝土开始出现微裂缝的限值 116×10^{-6} ,说明该工况下 PCCP 结构状态良好。当沉降差继续增大达到工况 5 时,管线局部最大主应变达到 121×10^{-6} ,开始出现微裂缝;工况 8 时,最大主应变达到

304×10^{-6} ;工况9时,插口截面突变处等大应变位置的最大主应变计算已经无法收敛,表明局部混凝土开裂破坏严重。

图6a)所示为4号管节管身中部管顶外侧应变变化情况。该处最大主应变方向为轴向,随着沉降差的增大,管芯应变基本不变,说明地基不均匀沉降对刚度较大的PCCP管身应力应变分布的影响很小。图6b)所示为7号管节管身中部管顶外侧应变变化情况。与4号管节不同,随着沉降差的增大,其环向应变逐渐减小,减小幅度约为 100×10^{-6} ,说明基底以下土层压缩会导致对上部管线的支撑作用减弱,从而使管芯环向应变分布特征发生较大的变化。工况9时,轴向应变急剧减小,最小达到 -150×10^{-6} ,说明过大的相对转角使相邻两管管顶挤压作用显著,管顶轴向受压,最大主应变方向

发生改变。图6c)所示为接头C插口管顶外侧应变变化情况。插口管顶处呈现悬臂梁的受力特征,当相对转角过大时,轴向应变明显增大,若沉降发生在完建期,则工况7~9下轴向应变分别为 128×10^{-6} 、 166×10^{-6} 、 258×10^{-6} ,若沉降发生在运行期,则工况7~9下轴向应变分别为 283×10^{-6} 、 332×10^{-6} 、 406×10^{-6} ,均已超过混凝土微裂缝开展的限值。对于最大主应变,工况7~9下超过 600×10^{-6} 的4个异常数据并非结构的真实应变,而是数值计算在此处已经无法收敛,结构出现了较严重的破坏。当沉降差发生在完建期时,沉降差超过48.1 cm后最大主应变计算无法收敛,而当沉降差发生在运行期时,沉降差超过34.8 cm后最大主应变计算就无法收敛,说明管道的内压会加剧插口管顶附近结构的破坏。

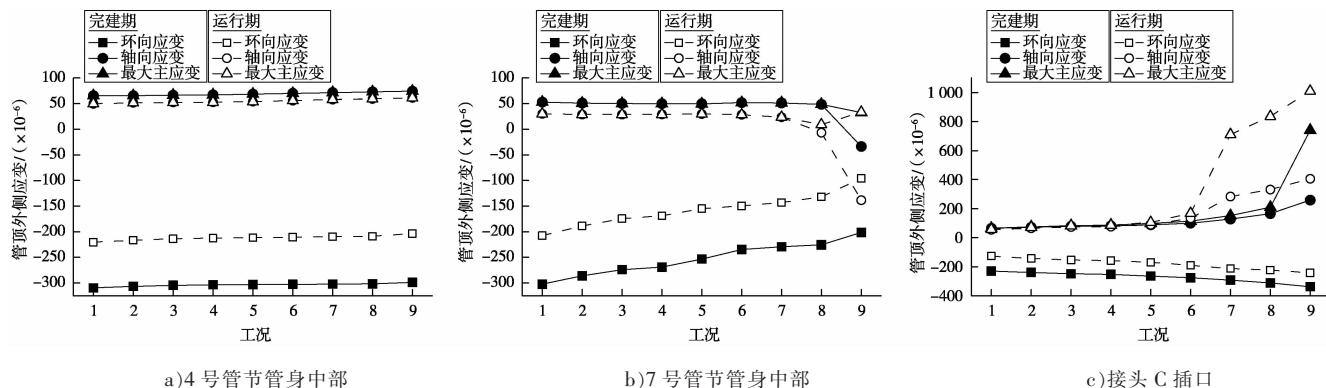


图6 不同管节管顶外侧应变变化情况

2.3 承插口结构的损伤与破坏模式

混凝土的微裂缝是指细小的、不相连的、无法用肉眼识别的裂缝,其存在改变了混凝土内部的微观结构,使结构内部的应力大小和分布状态发生了改变。微裂缝连接贯通后形成可见裂缝,使拉应变无法继续传递,裂缝继续发展最终导致结构失效。因此,混凝土的微裂缝是混凝土损伤的重要特征,结构微裂缝区域的大小和位置是表征结构损伤程度的重要指标。根据美国AWWA C304标准,C55混凝土微裂缝开展的临界拉应变为 116×10^{-6} 。由于微裂缝开展方向具有随机性,所以采用最大主应变来描述PCCP管芯微裂缝的开展区域。

图7所示为接头C插口部位微裂缝区域的分布与发展。当沉降差达到29.1 cm时,在2点钟和10点钟方向的插口截面变化位置首先出现微裂缝,并且随着沉降差的增大,微裂缝区域沿环向向管顶和管腰扩展,同时向管壁内部扩展;当沉降差达到65.9 cm时,管腰

以上已布满微裂缝,管腰处的微裂缝区域贯穿整个插口管壁,局部位置的微裂缝贯通产生可见裂缝。

图8所示为接头C承口部位微裂缝区域的分布与发展。当沉降差达到41.3 cm时,在管腰内侧距承口端面约40 cm的位置开始出现微裂缝,随着沉降差的增大,微裂缝区域变宽并沿环向向管顶扩展,同时向管壁内部扩展,但未扩展至钢筒的位置。接头F则仅在工况9时出现微裂缝,管顶挤压作用明显使微裂缝区域分为2个部分:一是由管芯外侧向管壁内部发展的微裂缝区域,深度大约为15 cm,局部开展至承插口异形钢板处;二是由管芯内侧向管壁内部发展的微裂缝区域,该区域面积较大,且在深度方向开展至钢筒处。

3 结论

- 当PCCP沿线土体沉降性状不同时,以沉降交界面为中心,地基不均匀沉降对管节转动的影响范围大致为8个管节(40 m),当沉降差超过35 cm时,管节

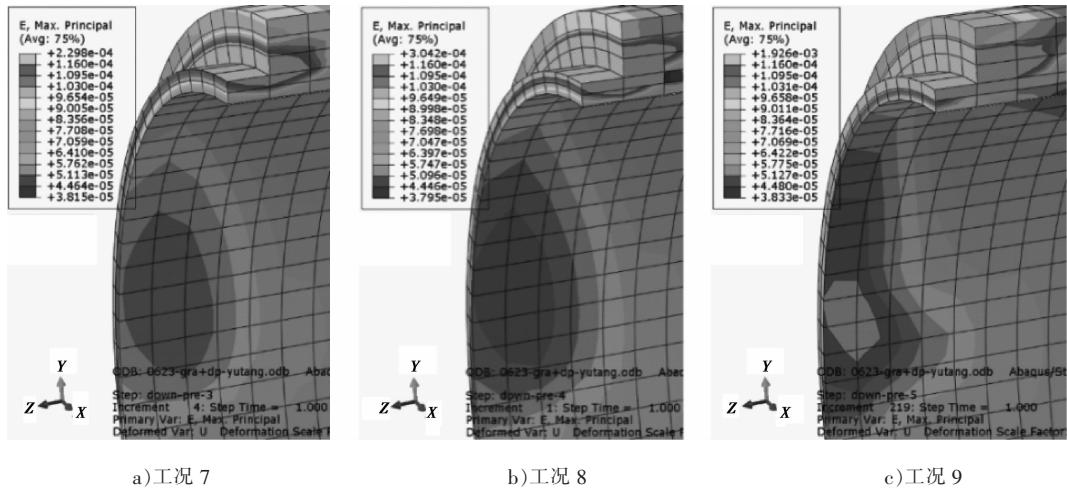


图 7 接头 C 插口部位微裂隙区域的分布与发展

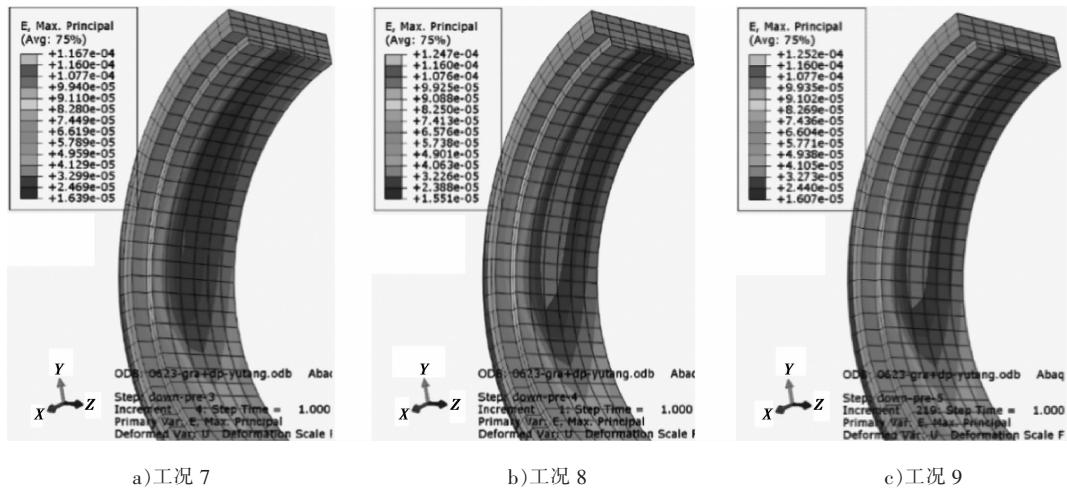


图 8 接头 C 承口部位微裂隙区域的分布与发展

间相对转角很容易超过设计规程限值(0.5°)，给 PCCP 结构带来损伤。

2)由于 PCCP 管身刚度较大,即使地基不均匀沉降会造成较大的管节转角,管身部位的应变分布也基本没有变化;由于截面与刚度的变化,不均匀沉降带来的管节转角造成的结构响应主要体现在接头的承插口部位。

3)PCCP 承插口的损伤模式可分为 2 种,一种是相对转角使管顶位置承插口受弯作用明显,插口呈现悬臂梁的受力特征;另一种是相对转角使管顶位置挤压作用明显。2 种模式均产生较大面积的微裂缝区域且范围随着沉降差的增大而扩大,并向管壁内部发展,进而影响 PCCP 的结构性能。

笔者主要研究了地基不均匀沉降下的大型 PCCP 力学响应机理,所采用的地基沉降性状与实际工程存在

一定的差异,未来待研究条件成熟后有必要进行 PCCP 的原位检测或监测试验,以获得更符合实际情况的地基沉降性状。**MET**

参考文献:

- [1] GE S, SINHA S. Effect of various bedding conditions on structural integrity of prestressed concrete cylinder pipe[J]. Journal of materials science research, 2015, 4(2):34–44.
- [2] XU Z, FENG X, ZHONG S, et al. Surface crack detection in prestressed concrete cylinder pipes using BOTDA strain sensors[J/OL]. Mathematical problems in engineering, 2017:1–12(2017–08–21) [2018–05–10]. <http://doi.org/10.1155/2017/9259062>.
- [3] MARSHALL J, FISK P S, FONTAINE L E. Detecting the effects of inadequate PCCP bedding[C]//ASCE. From underground to the forefront of innovation and sustainability, 2014:175–184.

(下转第 229 页)

2)加大项目施工策划并进一步优化项目资源配置。

项目实施初期,建筑业企业集团总部相关职能部门要做好施工策划,对尚有调节余地的项目,综合考虑合法合规、操作简便和有利于企业资质业绩积累等因素,科学谋划施工模式,合理分配施工任务,支持所属成员企业有效提升企业资质等级^[1]。

3)积极探索资质升级新途径。

建筑业企业在常规申报企业资质的同时,还可以拓宽工作思路,创新工作方法,积极探索以兼并、重组等方式尽快获得企业生产经营所急需的高等级资质途径。企业应主动与国家资质管理部门沟通,有效利用企业的国内外业绩来提升资质等级。同时,企业还可以通过与外部施工单位开展业务合作、加大成熟人才引进力度等形式^[2]进行行业绩和人才储备,以满足生产经营需要,实现资质升级目标。

4)加强资质管理的激励、约束机制。

建筑业企业应进一步加大对一级建造师等注册人员的奖励力度,鼓励员工积极报考企业生产经营或资质申报急需的专业,并给予适当的有明显档次区分的奖励。同时,企业还要将资质、资格管理工作列入绩效考核范围,将资质管理工作日常化、长期化、常态化。

5)加快项目经理和项目技术负责人队伍建设。

建筑业企业要高度重视项目经理和项目技术负责人队伍建设,对在建项目和即将开工项目的项目经理和项目技术负责人的就职资格要严格把关和认

真清理,凡不符合《注册建造师管理规定》的,要限期整改。对于取得一级建造师资格的人员,要有意识地充实到项目,给予其锻炼成长的机会,并逐步壮大有资格、懂管理、会经营的项目管理人才队伍。

6)抓好项目资料管理等基础工作。

建筑业企业要高度重视国家“四库一平台”建设对企业资质管理的影响,安排专人负责项目资料和项目关键管理人员个人资料的收集、整理、归档和信息录入等工作,以确保项目业绩满足资质申报要求。同时,企业还应定期检查、复核项目资料的管理情况,发现问题及时予以修正。

3 结语

建筑业企业应根据国家和资质管理部门的行政指导,高度重视企业资质建设与管理。同时,建筑业企业也应与时俱进、继往开来,在国家资质管理规定的框架下制定企业自己的资质管理办法和实施细则,并逐步完善其体制建设,引导企业健康、持续地发展。**MET**

参考文献:

(上接第 151 页)

- [4] 祁瑞花. 软土地基上南水北调 PCCP 供水管线工程施工关键技术研究[D]. 天津:天津大学,2013.
- [5] 王成华,尹书辉. 超载作用下 PCCP 管沉降性状三维有限元参数分析[J]. 建筑科学,2012(Sup1):29-32.
- [6] 孙立强,张京京,李恒,等. 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[J]. 岩土力学,2015,36(Sup1):293-298.
- [7] 北京市市政工程设计研究总院. 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] American Water Works Association. Design of prestressed concrete cylinder pipe: ANSI/AWWA C304-99[S]. USA: AWWA, 1999.
- [9] 钟胜,冯新,赵琳,等. 预应力钢筒混凝土管插口内壁环裂机理分析[J]. 市政技术,2016,34(4):122-128.
- [10] 钟胜,冯新,赵琳,等. PCCP 插口内壁混凝土抗裂措施的研究[J]. 混凝土与水泥制品,2016(11):28-31.

[1] 张永志. 关于加强企业资质管理的思考[J]. 中国煤炭工业, 2012(11):62-63.
[2] 陈勇. 建筑施工企业资质管理的思考与探索[J]. 科技与企业, 2012(10):65-66.

收稿日期: 2018-04-10

作者简介: 李水林,男,高级工程师,硕士,主要从事企业管理工作。

- [11] 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.
- [12] 苏庆田,杜霄,李晨翔,等. 钢与混凝土界面的基本物理参数测试[J]. 同济大学学报(自然科学版),2016,44(4):499-506.
- [13] 陈富强,田唯,刘占国,等. 匹配浇筑混凝土接触面摩擦系数试验研究[J]. 中国港湾建设,2014(12):34-38.
- [14] 中国市政工程华北设计研究总院. 城镇给水预应力钢筒混凝土管管道工程技术规程:CJJ 224-2014[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2015.

收稿日期: 2018-05-18

基金项目: 国家重点研发计划项目——城市市政管网运行安全保障技术研究(2016YFC0802400);国家自然科学基金面上项目——寒区埋地管道的分布式结构健康监测与实时安全预警方法研究(51378088)

作者简介: 陈博智,男,在读硕士研究生,主要研究方向为大型 PCCP 破坏机理与安全评价。