

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2022.02.011

考虑施工过程影响的 PCCP 地震响应分析

佟大威,王 星,任炳昱,余 佳,刘明辉

(天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室,天津 300350)

摘要: 为了研究地震作用下施工过程对预应力钢筒混凝土管(PCCP)的影响,建立考虑 PCCP 施工过程影响的非线性有限元模型,利用生死单元技术实现 PCCP 从地应力平衡到施加预应力钢丝预应力、铺设管道,再到回填回填土过程的有限元分析,以压实度作为衡量回填土施工质量的指标,基于黏弹性人工边界理论、等效节点力地震动输入法以及静-动力边界转换法,分析考虑施工过程以及不同回填土压实质量对 PCCP 地震响应的影响。结果表明,管道应力受自身和回填土重力的影响,考虑施工过程影响时内外层混凝土管顶、管底的外侧单元和管腰内侧单元的环向压应力比未考虑施工过程大,管顶、管底的内侧单元和管腰的外侧单元环向压应力比未考虑施工过程小;地震作用下,回填土均匀压实时,增大回填土压实度可降低 PCCP 插口处的轴向拉应力,回填土压实度越不均匀,管道之间的水平和竖直转角最大值也越大,回填土压实质量对竖直方向转角的影响大于对其水平方向的影响。

关键词: PCCP; 施工过程; 地震响应; 有限元

中图分类号: TU378 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2022)02-0076-07

Seismic response analysis of PCCP considering the effects of the construction process
TONG Dawei, WANG Xing, REN Bingyu, YU Jia, LIU Minghui
(State Key Laboratory of Water Conservancy Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

Abstract: In order to study the impact of the construction process on the prestressed concrete cylinder pipe (PCCP) under the action of an earthquake, a PCCP seismic response analysis method considering the impact of the construction process is proposed; a nonlinear finite element model that considers the impact of the PCCP construction process is established and the alive and death element technology is used to realize the finite element analysis of the PCCP from the ground stress balance to the application of prestressed steel wire prestress, pipe laying, and backfilling to determine the degree of compaction. As an index to measure the construction quality of backfills, based on the viscoelastic artificial boundary theory, equivalent nodal force ground motion input method and static-dynamic boundary conversion method, the analysis considers the construction process and the impact of different backfill compaction quality on the PCCP seismic response analysis. The results show that the stress of the pipeline is affected by the gravity of the backfill and itself. The hoop compressive stresses of the inner and outer concrete pipe tops, the outer units of the pipe bottom, and the inner units of the pipe waist are larger considering the influence of the construction process than those of the pipe top without considering the construction process. The hoop compressive stress of the inner unit of the tube bottom and the outer unit of the tube waist is smaller than the construction process without considering the construction process; under the the earthquake, the backfill soil is evenly compacted, and increasing the compression degree of the backfill soil can reduce the axial tensile stress at the PCCP socket. The more uneven the degree of backfill compaction, the greater the maximum value of the horizontal and vertical rotation angles between the pipes, and the impact of the backfill compaction quality on the vertical rotation angle is greater than the impact on the horizontal direction.

Key words: PCCP; construction process; seismic response; finite element

预应力钢筒混凝土管(prestressed concrete cylinder pipe,PCCP)兼备钢管的抗拉、抗渗性能和混凝土管的抗压、耐腐蚀等诸多优点,已广泛应用于各种生命线系统,如长距离输水工程。很多输水管线沿线区域具有地基软弱、处于地震带等特点,软土地基压缩模量低,在较小荷载作用下会产生较大的压缩变形^[1],特别是发生地震时地基易产生较大变形甚至震陷,而铺设在其上方的管道有可能遭到灾难性的破坏,因此有必要对

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0405006);天津市自然科学基金(19JCYBJC22600);国家自然科学基金(51679165)

作者简介: 佟大威(1982—),男,副教授,博士,主要从事地下结构仿真与抗震研究。E-mail:tongdw@tju.edu.cn

引用本文: 佟大威,王星,任炳昱,等. 考虑施工过程影响的 PCCP 地震响应分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(2):76-82.

TONG Dawei,WANG Xing,REN Bingyu,et al. Seismic response analysis of PCCP considering the effects of the construction process[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2022,50(2):76-82.

PCCP 进行地震响应分析以确保 PCCP 的安全稳定。

自 20 世纪 50 年代中期以来,国内外已经开展了 PCCP 在静动力作用下特性的研究。张社荣等^[2]利用 ANASY 建立了 PCCP 有限元模型,通过数值模拟了从制造到施工、运行过程中 PCCP 的受力特性。Stong 等^[3]通过 DIANA 建立了 PCCP-土壤相互作用有限元模型,对地基开挖前、基坑开挖、管道安装、铺垫层、回填土回填、钢丝损失 6 个阶段进行了数值模拟,研究表明预应力损失后核心结构的完整性取决于内置钢筒的完整性。Xin 等^[4]研究了地基不均匀沉降对 PCCP 结构稳定性的影响,研究结果表明,当不均匀沉降大于 35 cm 时,相对转角很容易超过设计规范。尹书辉^[5]利用 Plaxis 有限元软件,分析了土性、管道刚度、接口连接刚度、碎石垫层厚度等参数的变化对管道沉降的影响。Ge 等^[6]建立了 PCCP 的非线性有限元模型,考虑了不同垫层材料特性对 PCCP 结构完整性的影响,结果表明,PCCP 应放置在良好的垫层上,尤其是在无法避免岩石的山区。Hajali 等^[7-8]建立了 PCCP 三维数值模型,用敏感性分析法研究了断丝数量和断丝位置对受损 PCCP 结构性能的影响,结果表明,承插口处的钢丝断裂(尤其是套管接头)比位于管筒处的钢丝断裂更能降低 PCCP 的整体承压能力。张瑞君^[9]利用 ANSYS 软件研究了不同场地埋设深度、管道厚度、混凝土强度等级和地震波的特性(入射角、位移峰值和加速峰值)对 PCCP 地震响应的影响。赵翀等^[10-11]利用 ANSYS 软件建立了 PCCP 管道模型和土-弹簧模型,改进了基于设计反应谱的空间多点相关非平稳地震动的合成方法,开展了长距离 PCCP 埋地管道在地震波作用下的时程反应分析。李鹏辉^[12]利用 ANSYS 建立了 PCCP 弯管的三维有限元模型,分析了地震作用下边界条件、入射角、加速度峰值等因素对 PCCP 弯管应力应变值的影响。

综上所述,国内外研究人员对埋地管道静动力方面特性的研究已取得了一定的成果,但仍存在以下不足:①目前对 PCCP 的数值模拟以单独静力分析或单独地震动力分析为主,未考虑从地应力平衡、施加预应力钢丝预应力、铺设管道到回填回填土这一施工过程对 PCCP 地震响应分析的影响;②缺乏地震作用下不同回填土压实质量对 PCCP 应力特性影响的研究。

针对上述问题,本文提出了考虑施工过程影响的 PCCP 地震响应分析方法。利用有限元软件 ABAQUS 建立考虑管-土和管-管相互作用的有限元模型,基于黏弹性人工边界理论、等效节点力地震动输入法以及静-动力边界转换法,应用 MATLAB 编制了黏弹性边界和等效节点力自动施加方法,结合 ABAQUS 内的生死单元技术,以压实度作为衡量回填土施工质量的指标,分析考虑地应力平衡、施加预应力钢丝预应力、铺设管道到回填回填土这一施工过程以及不同回填土压实度对 PCCP 地震响应的影响。

1 考虑施工过程影响的 PCCP 地震响应分析模型

1.1 有限元模型

依据某配套管线工程建立 PCCP 模型,对内外层混凝土、钢筒、预应力钢丝、砂浆 4 个构件建模。每根管道长为 5 m,管道内径 2400 mm,管道外径 2775 mm,内芯混凝土厚度 56.5 mm,外芯混凝土厚度 97 mm,钢筒厚度 2 mm,预应力钢丝直径 7 mm,预应力钢丝间距 14 mm,砂浆保护层厚度 32 mm。整体计算模型共有 PCCP8 根,两管道之间留有 25 mm 间隙,承插口间的配合间隙为 2.8 mm,承插口按照图 1 进行建模,回填土为非均质土,前 4 段管道回填土 A 压实度为 a ,后 4 段管道回填土 B 压实度为 b ,按图 2 确定计算边界,图中 D 为管道外径。

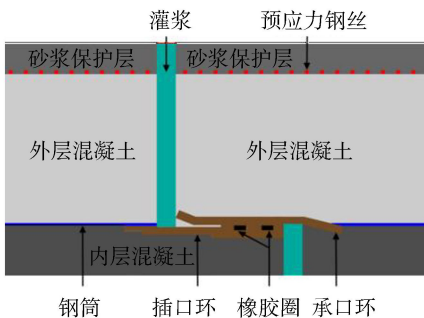


图 1 PCCP 结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of PCCP structure

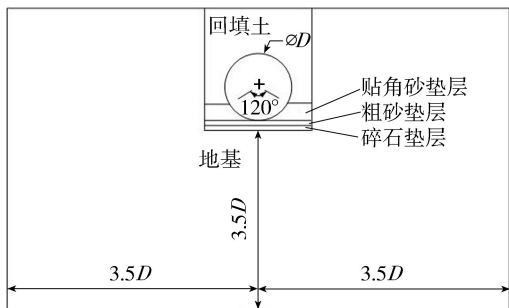


图 2 计算模型

Fig. 2 Calculation model

为减小网格尺寸对计算结果的影响,进行网格敏感性验证。将地基网格尺寸划分为 1400 mm、1200 mm、1000 mm、900 mm、800 mm、700 mm、500 mm,得到网格尺寸与计算时间、最大压应变和最大拉应变关系。网格

尺寸对计算结果的影响如图3所示。由图3可知,网格尺寸为900 mm时,计算结果趋于稳定,因此地基网格尺寸定为900 mm。划分好网格后的有限元计算模型如图4所示。

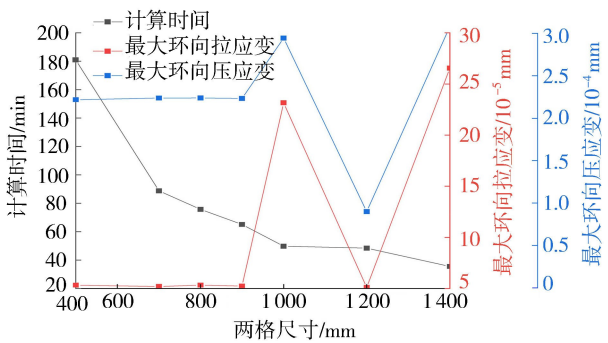


图3 网格尺寸对计算结果的影响

Fig.3 The influence of grid size on calculation results

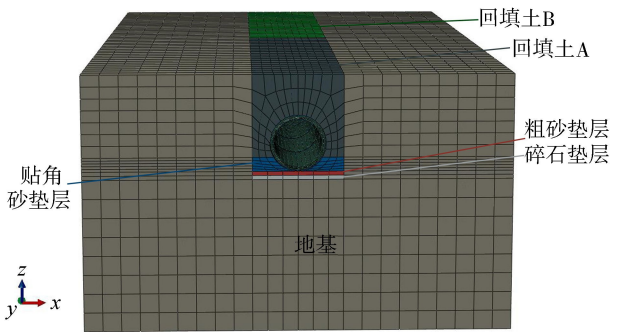


图4 有限元计算模型

Fig.4 Finite element calculation model

1.2 考虑施工过程影响的材料参数确定

地基、回填土、垫层采用莫尔-库伦塑性本构模型,内外层混凝土、砂浆采用混凝土塑性损伤模型,钢丝、钢筒采用弹塑性本构模型。内外层混凝土抗拉强度为1.71 MPa,抗压强度为19.1 MPa,砂浆保护层抗拉强度为1.10 MPa。钢丝预应力大小为772 MPa,膨胀系数为 10^{-5} 。

对回填土进行击实试验,获得压实度为0.65、0.75、0.85、0.95的土样;再对土样进行直剪试验和压缩试验,得到在不同压实度下土样的密度、压缩模量、黏聚力和内摩擦角等参数。PCCP和土体的计算参数^[13]如表1~3所示,地基密度为1.85 g/cm³,弹性模量为8 MPa,泊松比为0.3,内摩擦角为16.3°。

表2 垫层计算参数

Table 2 Calculation parameters of cushion				
垫层种类	密度/ (g·cm ⁻³)	弹性模量/ MPa	泊松比	内摩擦 角/(°)
碎石垫层	2.20	40.00	0.22	
粗砂垫层	1.67	30.47	0.35	23.39
贴角砂垫层	1.87	35.24	0.35	25.99

表1 回填土计算参数

Table 1 Calculation parameters of backfill				
压实度	密度/ (g·cm ⁻³)	压缩模量/ MPa	黏聚力/ MPa	内摩擦 角/(°)
0.65	1.28	1.982	0.00433	25.55
0.75	1.47	2.212	0.00463	30.15
0.85	1.67	3.047	0.00127	32.05
0.95	1.87	3.524	0.00203	32.05

表3 PCCP计算参数

Table 3 Calculation parameters of PCCP				
结构部位	密度/ (g·cm ⁻³)	弹性模量/ MPa	泊松比	屈服应 力/MPa
钢筒	7.85	210 000	0.3	227.5
预应力钢丝	7.85	200 000	0.3	1 320.0
混凝土核心	2.50	32 500	0.2	
砂浆	2.40	25 000	0.2	

1.3 接触模型

钢丝内置于砂浆保护层中并与外层混凝土外表面进行绑定约束,假设钢丝与混凝土之间无滑移;砂浆保护层内表面与外层混凝土外表面进行绑定约束;钢筒内置于内外层混凝土中,不考虑层间滑移和分离。

模型考虑管-土和管-管的相互作用,采用库伦摩擦模型。管-土接触切向为罚接触,摩擦系数取0.5^[14],法向为硬接触;管-管接触中的混凝土接触部分切向为罚接触,摩擦系数取0.75^[15],法向为硬接触,钢板之间切向接触为罚接触,摩擦系数取0.15,法向为硬接触。

1.4 考虑施工过程影响的边界条件设置

为模拟天然地基的无限延伸和辐射阻尼特性,不少学者先后提出了各类人工边界。其中,黏弹性人工边界由于能方便地利用程序自动生成大量的边界节点及单元,并且虚功方程易于推导,极大地提高了计算效率^[16]。地下结构地震响应分析中多采用黏弹性人工边界。

依据刘晶波等^[17]提出的黏弹性边界条件,计算边界节点等效物理系统的弹簧刚度系数与阻尼器的阻尼系数,切向边界和法向边界的弹簧刚度系数与阻尼器的阻尼系数计算公式为

$$K_{BT} = \alpha_T \frac{G}{R} C_{BT} = \rho C_S$$

(1)

$$K_{NT} = \alpha_N \frac{G}{R} C_{NT} = \rho C_P$$

(2)

式中: K_{BT} 、 K_{NT} 分别为弹簧的切向刚度和法向刚度; α_T 、 α_N 分别为黏弹性边界的法向和切向参数; C_{BT} 、 C_{NT} 分别为弹簧的切向阻尼系数和法向阻尼系数; C_s 、 C_p 分别为 S 波和 P 波波速,mm/s; R 为波源至人工边界点的距离,mm; ρ 为介质的密度,t/mm³。

对 PCCP 进行施工过程分析时,底部 3 个方向位移完全约束,四周约束垂直于边界方向位移;进行动力分析及对 PCCP 进行地震响应分析时,需要设置黏弹性人工边界来消除地震波的反射作用。本文在动力分析时通过在土体边界施加节点反力来代替侧向水平约束和竖向底边约束的方式,来完成静-动力边界条件的转换,原理如图 5 所示,实现对 PCCP 施工过程分析完成后继续进行地震响应分析的边界条件过渡。

1.5 地震波选取及输入

地震波采用宁河天津波,地点为天津医院,总持续时间为 19.12 s,时间间隔 0.02 s,适合三至四类场地土,配套管线工程抗震设防烈度为 8 度,四类场地土。为节约计算时间,根据文献[18]对输入地震荷载时间的要求,截取强震过程中的 6 s 作为分析时长,时间间隔为 0.02 s,共 300 步。

对于所选取的地震波,由于在记录过程中可能混杂干扰和误差信号,会使所记录的地震波出现基线偏移^[19]。为避免基线偏移的放大作用,对地震波进行基线校正。

由文献[20]的理论公式可知:所输入地震波的频率越高、土层越松软,对应模型的网格尺寸应越小。为了减小不必要的计算耗时,采用滤波的方法将原始地震波的高频部分滤掉。处理后的地震波如图 6 所示,由于篇幅限制,仅展示 SV 波处理后的结果。

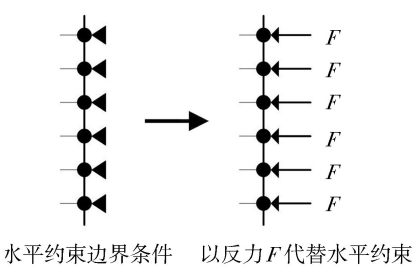


图 5 静-动力边界条件的转换示意图
Fig.5 Schematic diagram of the transformation of static-dynamic boundary conditions

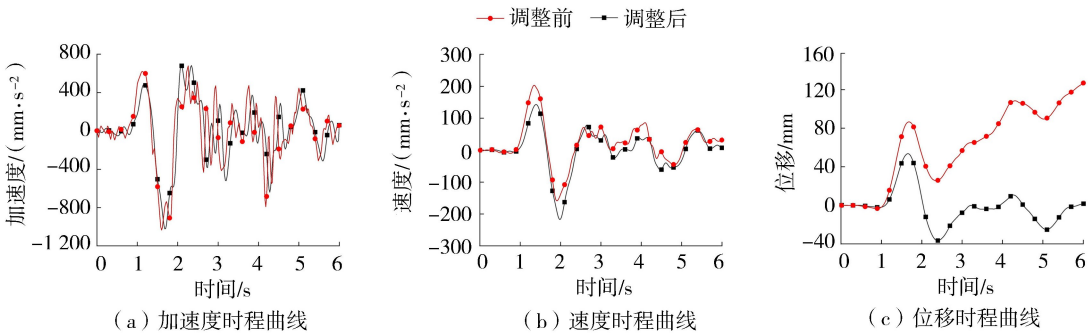


图 6 SV 波
Fig.6 SV wave

用黏弹性边界模拟无限地基辐射阻尼效应,进行结构-地基体系的地震响应分析时,地震动输入一般转化为人工边界节点上的等效节点力处理^[21]。根据何建涛等^[22]推导出的地震动输入公式输入地震波。

1.6 计算工况

反映回填土压实质量好坏最重要的指标是回填土的压实度^[23],为了分析地震作用下回填土压实度对 PCCP 的影响,分析了 10 个工况,工况名称及对应的压实度如表 4 所示。

1.7 考虑施工过程影响的 PCCP 地震响应有限元分析流程

a. 模态分析。对 10 个工况的计算模型进行模态分析,求出结构的前 2 阶自振频率,并计算 Rayleigh 阻尼系数:

$$\alpha = \frac{2\xi \omega_1 \omega_2}{\omega_1 + \omega_2} \tag{3}$$

$$\beta = \frac{2\xi}{\omega_1 + \omega_2} \tag{4}$$

表 4 计算工况		
Table 4 Calculation conditions		
工况名称	回填土 A 压实度 a	回填土 B 压实度 b
E1-1	0.65	0.65
E1-2	0.75	0.65
E1-3	0.85	0.65
E1-4	0.95	0.65
E2-2	0.75	0.75
E2-3	0.85	0.75
E2-4	0.95	0.75
E3-3	0.85	0.85
E3-4	0.95	0.85
E4-4	0.95	0.95

式中: α 、 β 为比例系数; ω_1 、 ω_2 为前两阶振型的圆频率,rad/s; ξ 按照经验一般取 0.05^[24]。

- b. 静动力边界转换提取边界节点反力。对模型整体施加重力,完成分析后,导出土体边界节点反力。
- c. 考虑 PCCP 施工过程的地震响应分析。PCCP 的施工过程主要包括基底处理、管道安装、砂浆层回填和回填土回填 4 个步骤。利用生死单元技术实现 PCCP 施工过程的数值模拟,分析步包括地应力平衡、施加预应力钢丝预应力、铺设管道、回填回填土、地震分析。①地应力平衡分析步需将 PCCP、回填土部件全部“杀死”,利用地应力平衡法对地基和垫层施加初始地应力。②施加预应力钢丝预应力分析步需要激活内外层混凝土、钢筒以及钢筋,通过降温法对预应力钢丝施加预应力,钢丝预应力为 772 MPa。③在铺设管道分析步激活垫层以及砂浆保护层,对 PCCP 施加重力。④在回填土回填分析步激活回填土,对回填土施加重力。⑤地震分析时,利用 MATLAB 编程实现黏弹性人工边界和等效节点力的自动输入,通过生死单元技术在 inp 文件中添加语句激活黏弹性人工边界单元,将 b 步得到的节点反力输入到 inp 文件中代替模型的侧向水平约束和竖向底边约束,在 PCCP 施工过程分析的基础上进行地震动力分析,使用等效荷载法施加地震荷载。

1.8 模型验证

以本文的有限元模型建立方法为基础,依据钟胜^[25]建立的有限元模型尺寸和材料参数建立 PCCP 有限元模型,如图 7 所示,进行 PCCP 施工过程的力学响应分析,通过对比分析计算结果,对本文建立的有限元模型的可靠性进行验证。

对 PCCP 从生产制造、基坑开挖、管道安装、回填土回填的施工过程进行数值模拟,荷载步依次为地应力平衡、施加预应力钢丝预应力、铺设管道、回填土回填,计算 PCCP 在各个阶段结构的应力变化规律,内外层混凝土在各分析步下的应力结果如图 8 所示。

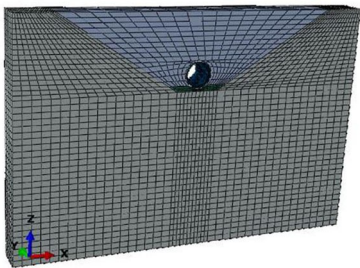


图 7 有限元计算模型
Fig. 7 Finite element calculation model

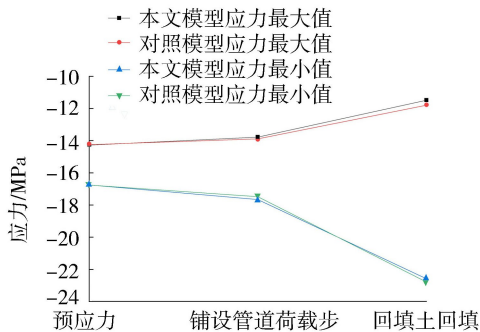


图 8 各荷载步下的环向应力
Fig. 8 Circumferential stresses at each load step

从图 8 可以看出,内外层混凝土的环向压应力最大值随着荷载步的施加而增大,最小值随着荷载步的施加而减小,本文方法与对照组方法的计算结果较为吻合,说明本文所建的有限元模型较为可靠。

2 结果分析

2.1 预应力钢丝施加预应力结果

预应力钢丝设计缠丝应力为 772 MPa,缠丝完成后钢丝中间段的应力分布如图 9 所示,预应力钢丝中间段的应力分布较为均匀,均值应力 739 MPa,预应力损失为 4.27%,这是混凝土管芯收缩导致的钢丝预应力损失,本文预应力钢丝施加预应力后的应力分布规律与张宏宇等^[26]的研究结果一致。

2.2 考虑施工过程影响的 PCCP 地震响应

为探究考虑施工过程对 PCCP 地震响应的影响,分别计算考虑施工过程与未考虑施工过程时 PCCP 的地震响应。分析得知 PCCP 的管腰、管顶和管底处为应力极值分布区域,计算内外层混凝土中间段管腰、管顶和管底处典型单元在地震过程中的环向应力均值,结果如表 5 所示。由表 5 可知,地震作用下,不同部位的规律变化不同,考虑施工过程时管顶和管底外侧单元、管腰内侧单元的环向压应力比未考虑施工过程大,考

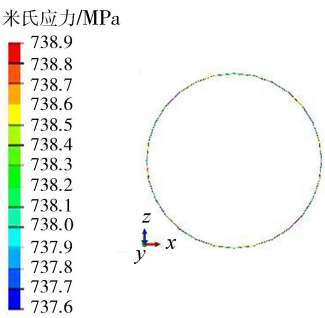


图 9 施加预应力预应力钢丝应力云图

Fig. 9 Stress cloud of prestressed steel wire with prestress applied

虑施工过程时管顶和管底内侧单元、管腰外侧单元的环向压应力比未考虑施工过程小。

表 5 地震作用下各部位环向压应力均值

Table 5 Average value of circumferential compressive stress of each part under earthquake

工况名称	各部位环向压应力均值/MPa					
	管顶外侧	管顶内侧	管底外侧	管底内侧	管腰外侧	管腰内侧
考虑施工过程影响	6.90	5.30	6.77	5.72	5.30	8.19
未考虑施工过程影响	5.93	6.57	5.93	6.58	5.88	6.61

2.3 地震作用下回填土压实度对 PCCP 的影响

回填土均匀回填,地震作用结束时,承插口部位已沿轴向方向受拉破坏,因此重点对内外层混凝土插口处的轴向应力进行分析。地震作用下各段管道插口处典型单元的轴向应力均值如表 6 所示。由表 6 可知,各段管道插口处轴向应力均值随着回填土压实度的增大而降低;回填土压实度增大对内外层混凝土插口处的影响先增大后降低,其中回填土压实度从 0.75 提升至 0.85 时对其轴向拉应力降低的效果最明显。

回填土非均匀回填时,利用 PYTHON 编制了提取 PCCP 间转角的脚本,分析了管 5 和管 6 之间竖直和水平转角在不均匀回填土压实度作用下随地震作用的变化,得到了 5 与管 6 之间的转角在不同工况下的极值,结果如表 7 所示。由表 7 可知,地震作用下,回填土压实度越不均匀,管 5 和管 6 间转角的最大值越大;不均匀回填土压实度对 PCCP 之间竖直方向转角的影响大于对其水平方向的影响。

3 结 论

a. 提出了考虑施工过程影响的 PCCP 地震响应分析方法,利用生死单元技术实现了 PCCP 施工过程的有限元分析,基于黏弹性人工边界和等效节点力输入地震波理论,利用 MATLAB 编制了黏弹性人工边界和等效节点力自动施加程序,基于静-动力边界条件转换方法实现了考虑施工过程的 PCCP 地震响应分析,以压实度作为回填土压实质量的指标,分析了不同回填土压实度对 PCCP 地震响应分析的影响。

b. 地震作用下,管道应力受自身和回填土重力的影响,考虑施工过程时管顶和管底外侧单元、管腰内侧单元的环向压应力比未考虑施工过程大,考虑施工过程时管顶和管底内侧单元、管腰外侧单元的环向压应力比未考虑施工过程小。因此,应考虑施工过程对埋地管道地震响应分析的影响。

c. 基于管-土耦合模型,回填土均匀回填时,增大回填土压实度对内外层混凝土插口处拉应力的影响先增大后降低,其中回填土压实度从 0.75 提升至 0.85 时对轴向拉应力降低的效果最明显。回填土非均匀回填时,回填土压实度越不均匀,管 5 和管 6 之间的水平和竖直转角最大值也越大,不均匀回填土压实度对 PCCP 之间竖直方向转角的影响大于对其水平方向的影响。

参考文献:

[1] 温晓英,程子悦,郭晓光. 大口径 PCCP 管在软土地基中的应用[J]. 中国给水排水,2012,28(2):1-4. (WEN Xiaoying, CHENG Ziyue, GUO Xiaoguang. Application of large diameter PCCP in soft soil foundation[J]. China Water & Wastewater, 2012,28(2):1-4. (in Chinese))

[2] 张社荣,张彩秀. 预应力钢筒混凝土管(PCCP)的数值仿真分析[J]. 哈尔滨工业大学学报,2009(8):125-129. (ZHANG Sherong, ZHANG Caixiu. Numerical simulation analysis of prestressed concrete cylinder pipe[J]. Journal of Harbin Institute of

表 6 地震作用下各段管道典型单元的轴向应力均值

Table 6 Average axial stress values for typical cells in each section of pipe under seismic action

管道	各工况的轴向应力均值/MPa			
	E1-1	E2-2	E3-3	E4-4
管 2	1.61	1.58	1.54	1.51
管 3	1.68	1.65	1.61	1.59
管 4	1.70	1.67	1.64	1.61
管 5	1.71	1.69	1.65	1.63
管 6	1.73	1.70	1.67	1.64
管 7	1.71	1.68	0.64	1.61

表 7 管 5 与管 6 之间的转角在不同工况下的极值

Table 7 Extreme values of the angle of rotation between tube 5 and tube 6 for different operating conditions

工况	竖直转角/(°)	水平转角/(°)
E1-1	0.1368	0.1076
E1-2	0.1530	0.1155
E1-3	0.1619	0.1177
E1-4	0.1737	0.1216
E2-2	0.1374	0.1082
E2-3	0.1505	0.1137
E2-4	0.1625	0.1180
E3-3	0.1374	0.1082
E3-4	0.1493	0.1113
E4-4	0.1376	0.1070

Technology,2009(8):125-129. (in Chinese))

- [3] STONG T J,JORGENSON R R,FARNSWORTH D E,et al. Condition assessment of prestressed concrete cylinder pipe used in the circulating water system at Great River Energy's Coal Creek Station[J]. International Conference on Pipeline Engineering and Construction,2007(4):1-10.
- [4] XIN Feng,LI Haizhen,CHEN Bozhi,et al. Numerical investigations into the failure mode of buried prestressed concrete cylinder pipes under differential settlement[J]. Engineering Failure Analysis,2020,111:UNSP 104492.
- [5] 尹书辉. 软土地基中 PCCP 管施工过程与工作性状的非线性数值模拟[D]. 天津:天津大学,2010.
- [6] 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.
- [7] HAJALI M,ALAVINASAB A,SHDID C A. Effect of the location of broken wire wraps on the failure pressure of prestressed concrete cylinder pipes[J]. Structural Concrete,2015,16(2):297-303.
- [8] HAJALI M,ALAVINASAB A,SHDID C A. Effect of the number of broken wire wraps on the structural performance of PCCP with full interaction at the gasket joint[J]. Journal of Pipeline Systems Engineering & Practice,2016,7(2):04015026. 1-04015026. 8.
- [9] 张瑞君. 考虑空间与时间效应 PCCP 地震效应分析[D]. 郑州:华北水利水电大学,2016.
- [10] 赵翀. 城市输水管道地震安全评价[D]. 大连:大连理工大学,2015.
- [11] 赵翀,李昕,王国新. 长输管道在多点输入下的地震响应分析[J]. 防灾减灾学报,2015(1):10-15. (ZHAO Chong,LI Xin,WANG Guoxin. Seismic response analysis of long-distance pipeline subjected to spatially varying earthquake ground motions[J]. Journal of Disaster Prevention and Reduction,2015(1):10-15. (in Chinese))
- [12] 李鹏辉. 地下埋置预应力钢筒混凝土管(PCCP)弯管的三维动力分析[D]. 郑州:华北水利水电大学,2017.
- [13] 嵇瑞花. 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,2014.
- [14] 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(增刊1):293-298. (SUN Liqiang,ZHANG Jingjing,LI Heng,et al. Research on key factors influencing relative angle of prestressed concrete cylinder pipe in soft soil foundation[J]. Rock and Soil Mechanics,2015,36(Sup1):293-298. (in Chinese))
- [15] 陈博智. 运行与环境荷载作用下 PCCP 的结构安全评价研究[D]. 大连:大连理工大学,2018.
- [16] 王立涛,陈厚群,马怀发. 人工黏弹性边界的接触非线性问题在 FEPC 中的实现[J]. 水力发电学报,2009,28(5):179-181. (WANG Litao,CHEN Houqun,MA Huaifa. Computation of dynamical contact problems with artificial boundary conditions based on FEPC[J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2009,28(5):179-181. (in Chinese))
- [17] 刘晶波,吕彦东. 结构-地基动力相互作用问题分析的一种直接方法[J]. 土木工程学报,1998(3):55-64. (LIU Jingbo,LYU Yandong. A direct method for analysis of dynamic soil-structure interaction[J]. China Civil Engineering Journal,1998(3):55-64. (in Chinese))
- [18] LEE V W,GHOSH T,SABBAN M S. Scattering and diffraction of plane P waves by 3-D cylindrical canals[J]. European Earthquake Engineering,1996,4(3):12-22.
- [19] 张鸿. 地震波作用下地下隧洞结构动力响应特征研究[D]. 北京:北京科技大学,2015.
- [20] KUHLEMEYER R L L J. Finite element method accuracy for wave propagation problems[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division,1973,SM5(99):421-427.
- [21] 王海波,李德玉. 拱坝抗震设计理论与实践[M]. 北京:中国水利水电出版社,2005.
- [22] 何建涛,马怀发,张伯艳,等. 黏弹性人工边界地震动输入方法及实现[J]. 水利学报,2010,41(8):960-969. (HE Jiantao,MA Huaifa,ZHANG Boyan,et al. Method and realization of seismic motion input of viscous-spring boundary[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2010,41(8):960-969. (in Chinese))
- [23] 佟大威,孙立强. PCCP 管施工回填土深层压实度检测方法研究[J]. 地下空间与工程学报,2018,14(1):236-240. (TONG Dawei,SUN Liqiang. Research on compactness measurement method for deep backfill soil of PCCP construction[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2018,14(1):236-240. (in Chinese))
- [24] 李婕. 地下铁道地震动力响应分析[D]. 成都:西南交通大学,2010.
- [25] 钟胜. 大口径埋地管道结构分析与安全评价研究[D]. 大连:大连理工大学,2017.
- [26] 张宏宇,彭华. PCCP 受载响应全过程有限元分析[J]. 水利水电技术,2014,45(10):60-64. (ZHANG Hongyu,PENG Hua. Finite element analysis on whole process of load-bearing response of PCCP[J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2014,45(10):60-64. (in Chinese))