

预应力钢筒混凝土管插口内壁环裂机理分析

钟 胜,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 116024)

摘 要:插口内壁环裂是预应力钢筒混凝土管(PCCP)普遍存在的问题,其产生机理复杂。国内外标准对 PCCP 混凝土裂缝规定不一,对管道裂缝的性质判定、处置方式及预防措施等问题一直困扰着工程建设者。笔者建立了预应力钢筒混凝土管的三维非线性有限元模型,对其生产制作过程中的预应力钢丝缠绕、管道吊运以及管芯混凝土干缩等典型受力工况进行了数值模拟。研究表明:在预应力钢丝缠绕后,环裂在插口端 200 mm 左右产生,并已贯穿至钢筒内壁;吊运过程将加剧裂缝宽度及塑性区的发展,且插口端外壁混凝土被拉伸破坏;后期混凝土的干缩中,环裂成为干缩的自由边界,环裂宽度将进一步扩展,塑性区宽度达到 60 mm 左右。PCCP 插口内壁环裂机理的研究成果,可为制订环裂预防措施和进行管道结构安全评价提供科学依据。

关键词:预应力钢筒混凝土管;插口;环裂;机理;非线性有限元分析

中图分类号: TU 528.73 **文献标志码:** B **文章编号:** 1009-7767(2016)04-0122-07

Mechanism Analysis of the Socket In-wall Ring Cracks of Pre-stressed Concrete Cylinder Pipe

Zhong Sheng, Feng Xin, Zhao Lin, Zhou Jing

预应力钢筒混凝土管(Pre-stressed Concrete Cylinder Pipes, 简称 PCCP)是由带钢筒的高强混凝土管芯在缠绕预应力钢丝后,再喷涂水泥砂浆保护层制成的复合型管材。管身两端采用钢制承插口与钢筒焊接,由承插口的凹槽与胶圈组成管端滑动式半刚性接头。由于良好的工作性能,自 20 世纪 40 年代以来 PCCP 被广泛应用于市政、电力、水利等工程项目。如北美地区已经铺设了 35 000 km 多的 PCCP。随着 PCCP 的广泛应用,美欧等发达国家对其力学行为、退化机理、检测评定和维修加固等进行了较为系统的研究^[1-3]。我国自 20 世纪 80 年代中期引入 PCCP 以来,经过 20 多年的发展已初步形成了一套自己的设计、制造、施工规范和体系,并在南水北调等重大工程中得到成功应用^[4-7]。

1 我国 PCCP 裂缝机理研究现状

PCCP 在生产、安装和服役过程中会因各种原因出现混凝土裂缝,较为典型的是在管道内壁出现螺旋裂缝、环向裂缝和纵向裂缝,其中以插口端 200~300 mm 范围内的环向裂缝最为常见。资料显示,插口内壁环裂约占裂缝管芯数量的 90%^[8]。尽管国家标准《预应力钢筒混凝土管》^[9]允许 PCCP 管芯内壁混凝土存在裂缝,

但是由于中外标准对于管芯外壁裂缝的规定不统一,造成裂缝的防治、处理缺乏科学依据^[10],特别是在后续的服役过程中,环向裂缝无法全部闭合,造成管内液体通过环向缝隙直接接触插口异型钢板,甚至会延伸至钢筒处,使钢筒产生腐蚀,加剧 PCCP 结构状态的退化,缩短了使用寿命。因此,科学揭示 PCCP 插口内壁的环裂机理,对于插口环裂的预防措施、诊治处理以及管道结构状态评价具有积极意义。

我国对 PCCP 混凝土裂缝形成的原因和机理已有一定研究。沈捷^[11]对裂缝管和断丝管分别进行原型试验,并运用 ABAQUS 对原型试验管道进行数值模拟。胡少伟等^[12]进行了原型管道的抗裂外压承载力试验,探讨了预存管芯外壁纵向裂缝对承载力的影响,分析了混凝土管的受力特性,对 PCCP 抗裂外压试验进行结构数值模拟。余洪方等^[13]对 PCCP 各种裂缝的产生原因进行了总结,探讨了消除裂缝的具体措施。刘卿春等^[14]对 PCCP 插口环裂发生的原因进行了分析,认为主要原因是插口异型钢板与端部管芯混凝土之间产生滑移及脱离。唐连涛^[15]结合大口径 PCCP 管生产经验,通过调查、统计、分析、原型检验、成因分析和生产

实践的方式,对管芯内壁混凝土环向裂缝问题进行了研究,提出了环裂控制措施。分析当前研究现状可知,在 PCCP 插口内壁环裂研究方面,主要以现象观察、调查统计和定性分析为主,缺少对环裂机理的定量力学分析。

笔者基于 ABAQUS 软件建立 PCCP 的三维非线性力学分析模型,模拟管道在生产过程中的预应力施加、管道吊装和混凝土干缩等典型荷载作用,获得管道的应力反应和损伤演化,揭示管道插口内壁的环裂形成机理。

2 有限元模型

2.1 问题描述

PCCP 为分层结构,是由内层高强混凝土、薄钢筒、外层高强混凝土、高强预应力钢丝和砂浆保护层构成的复合型管材,这种结构能够充分发挥混凝土抗压、钢丝抗拉、钢筒抗渗等各自的优点。其中,钢筒具有抗渗和抵抗纵向应力的作用;高强混凝土与钢筒组成刚性管芯,可抵御较大的外荷载防止发生屈服;预应力钢丝施加预应力可承担内外荷载;砂浆保护层保护预应力钢丝不受外界环境侵蚀,也增强了管体的整体刚度。

PCCP 的制作是一个多工序、多控制目标的复杂生产过程。其承插口环由检验合格的钢带卷圈焊接成闭合环,然后经胀圆机胀圆定型;薄钢筒采用螺旋制筒机焊接成型,承插口圈焊接在钢筒的两端;埋置式预应力钢筒混凝土管(PCCPE)管芯采用立式离心工艺生产成型,钢筒按照设计在管芯的位置处被吊入正在浇筑的混凝土中,然后振捣最终形成管芯;管芯养护到设计强度的 70% 时,将管芯吊至缠丝机台,钢丝经张拉后以一定的间距螺旋式缠绕在管芯上,然后在预应力钢丝外部喷射砂浆保护层;管道制成后存于露天环境,被放倒养护至管道安装。在上述过程中,PCCP 主要承受缠丝预应力、管道吊运荷载、混凝土干缩效应等。这些荷载的共同作用将导致管道插口内壁出现环裂现象,因此笔者将采用三维非线性有限元模拟实际管道的生产制作过程,先后对管道施加环向预应力、吊运荷载,并考虑管芯混凝土的干缩效应,分析管道插口的应力分布和损伤行为。

笔者以某供水工程中的大口径埋置式 PCCP 管道为例进行分析。管道公称直径为 3 200 mm,设计内压为 1.2 MPa,覆土深度为 4 m,部分材料参数如表 1 所示。

2.2 有限元离散及分析过程

2.2.1 有限元离散

采用 ABAQUS 软件进行 PCCP 生产过程的受力模

表 1 PCCP 材料参数表

材料	密度/ (kg/m ³)	弹性模量/ MPa	受压强度/ MPa	受拉强度/ MPa	泊松 比
钢丝	7 833	205 000	1 570	1 570	0.3
混凝土	2 500	34 500	42.92	2.64	0.2
钢筒	7 833	206 000	215	215	0.3
砂浆	2 200	24 165	36.21	3.49	0.2

拟,混凝土管芯、砂浆、钢筒、承插口钢环和钢丝分别采用分离式模型建模。管芯混凝土、砂浆保护层和承插口钢环使用八节点六面体线性减缩积分实体单元(C3D8R)进行离散,单元网格尺寸为 100 mm×100 mm×100 mm,混凝土管芯模型离散了 37 128 个单元,砂浆保护层模型离散了 5 750 个单元。钢筒壁厚为 1.5 mm,与管道整体尺寸相差甚远,属于薄壁结构,采用四节点壳单元(S4R)进行离散,单元尺寸为 100 mm×100 mm×1.5 mm,共剖分了 5 250 个单元。高强预应力钢丝对管芯混凝土的作用采用降温法进行模拟,每环钢丝离散为 100 个杆单元(Truss)。在施加预应力钢丝时,去除了砂浆保护层的作用,模型中将钢筒和预应力钢丝都采用嵌入作用(Embedded)在混凝土实体单元中;砂浆保护层采用绑定作用(Tie)在管芯混凝土的外层。模型假设混凝土管芯与钢筒、钢丝以及钢丝与砂浆之间没有相对滑移和脱空,从而把各个单元的自由度约束在一起。为了详细分析插口环裂行为,将插口端混凝土管芯进行细化,单元尺寸为 20 mm×20 mm×20 mm。管道有限元模型如图 1 所示。有限元模型的材料本构和预应力的施加将在 2.3 节和 2.4 节介绍。

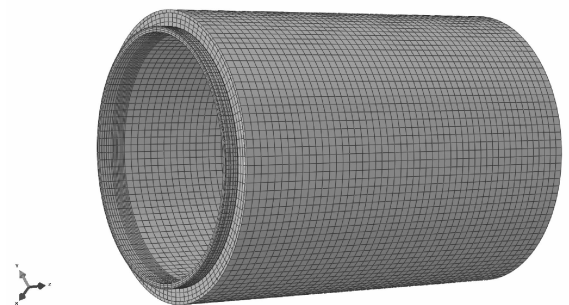


图 1 PCCP 有限元模型

2.2.2 分析步骤

根据 PCCP 管在生产中的实际受力情况,分成 3 步对 PCCP 加载:

1) 施加缠丝预应力

根据 PCCP 的制造流程,预应力钢丝缠绕于管芯混凝土之后,应对管芯混凝土施加缠丝预应力,计算管芯的应力分布。由于砂浆保护层在缠丝结束后进行喷涂,因此在计算 PCCP 初始应力场时,可不考虑砂浆保护层的作用。

2) PCCP 吊运荷载模拟

PCCP 在成型、脱模、缠丝和喷涂水泥砂浆保护层时均为立式操作,需要将管道移动至不同工位。移动过程中,管道在插口环形钢板处受到与自身质量相等的吊运荷载作用。在数值模拟中,对管道有限元模型上部自由度施加竖直方向约束,以自身质量作用模拟吊运荷载。

3) 混凝土管芯干缩效应模拟

管道制成后被放倒养护直至管道安装,一般设计天数为 90 d。在此过程中,管芯内壁不但完全暴露于大气环境,而且通风较好,因此干缩变形发展较快。干燥收缩始发于裸露表面,愈深入内部,脱水愈慢愈少,因此在模型中干缩效应仅通过对管芯内壁混凝土表层施加等效温低进行模拟。根据文献^[16-17]混凝土的干缩应变约为 300×10^{-6} ,计算中以温低效应产生的应变模拟混凝土干缩行为,因此对管芯内表面混凝土温度降低 30 ℃。

在整个有限元模型中,均考虑重力因素。需要指出 PCCP 生产过程的分阶段模拟,每一步骤的计算结果均对后一步骤有效,因此最终分析结果是对 3 种荷载效应的总体分析。

2.3 材料本构

有限元模型中预应力钢丝、钢管及承插口钢环的应力-应变关系均假定为理想弹塑性,其弹性模量如表 1 所示。

混凝土本构关系采用混凝土损伤塑性 (Concrete Damage Plasticity, 简称 CDP) 模型。CDP 模型采用各向同性弹性损伤及各向同性拉伸和压缩塑性理论来表征混凝土的非弹性行为,可以模拟低静水压力时混凝土受到单调、循环或动载作用下的力学行为,并通过结合非关联多重硬化塑性和各向同性弹性损伤理论来表征材料断裂过程中的不可逆损伤行为。CDP 模型中拉伸和压缩采用不同的损伤因子来描述刚度退化,单轴刚度退化变量是等效塑性应变的非减函数,取值在 0~1 之间。非弹性阶段的应力-应变关系,塑性损伤因子采用《混凝土结构设计规范》^[18]推荐的关系。

在受压状态下,混凝土塑性损伤因子定义为:

$$d_c = \begin{cases} 1 - \rho_c [\alpha_a + (3 - 2\alpha_a)x + (\alpha_a - 2)x^2] & x \leq 1 \\ 1 - \frac{\rho_c}{\alpha_d(x-1)^2 + x} & x > 1 \end{cases} \quad (1)$$

$$\sigma = (1 - d_c) E_c \varepsilon \quad x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} \quad \rho_c = \frac{f_c^*}{E_c \varepsilon_c}$$

式中: α_a, α_d 为混凝土单轴受压应力-应变曲线上升段、下降段的参考值; f_c^* 为混凝土单轴抗压强度; ε_c 是与单轴抗压强度 f_c^* 相对应的混凝土峰值压应变; d_c 是混凝土单轴受压损伤演化参数。

在受拉状态下,混凝土塑性损伤因子定义为:

$$d_t = \begin{cases} 1 - \rho_t [1.2 - 0.2x^5] & x \leq 1 \\ 1 - \frac{\rho_t}{\alpha_t(x-1)^{1.7} + x} & x > 1 \end{cases} \quad (2)$$

$$\sigma = (1 - d_t) E_c \varepsilon \quad x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_t} \quad \rho_t = \frac{f_t^*}{E_c \varepsilon_t}$$

式中: α_t 为混凝土单轴受压应力-应变曲线下下降段的参考值; f_t^* 为混凝土单轴抗拉强度; ε_t 是与单轴抗拉强度 f_t^* 相对应的混凝土峰值拉应变; d_t 是混凝土单轴受拉损伤演化参数。

管芯混凝土的单轴应力-应变关系曲线如图 2 和图 3 所示,对应的受压损伤因子 d_c 和受拉损伤因子 d_t 随应变的变化曲线计算结果如图 4 和图 5 所示。对高强度大体积混凝土所进行的大批室内试验表明^[19],当损伤程度达到临界状态,即 $d_c = d_t = 0.50 \sim 0.54$ 时,混凝土就萌生宏观裂缝。

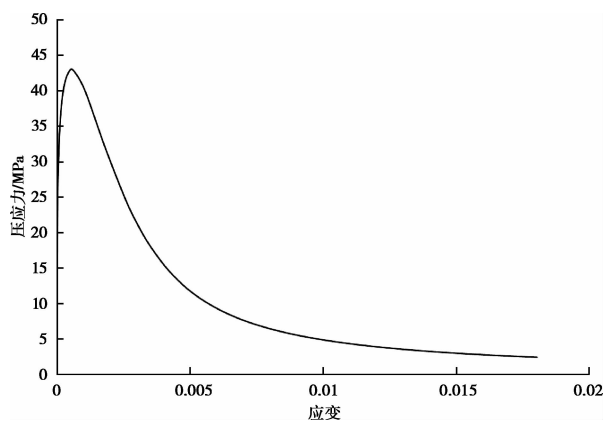


图 2 混凝土受压应力-应变关系图

水泥砂浆在加载过程中,损伤是连续的,微损伤随加载而发展,内部损伤的演化与积累导致表观弹性模量的降低^[20]。对于水泥砂浆材料要建立一个能适应各种加载条件并充分考虑各种内、外部作用的完善的本构模型显然是很困难的。混凝土损伤塑性模型需要

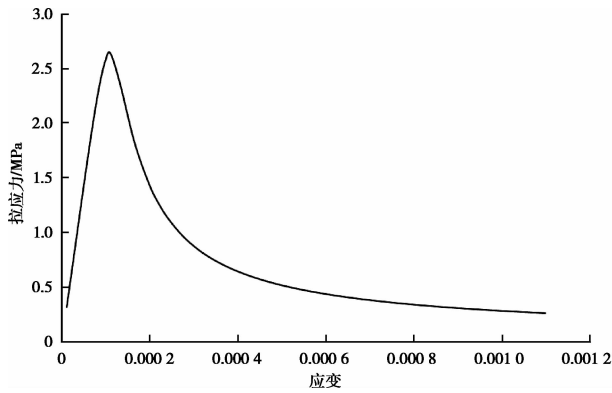


图3 混凝土受拉应力-应变关系图

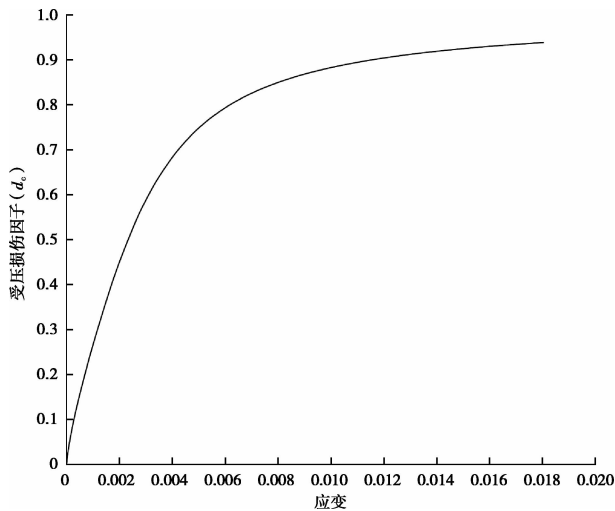


图4 混凝土受压应变与损伤因子关系图

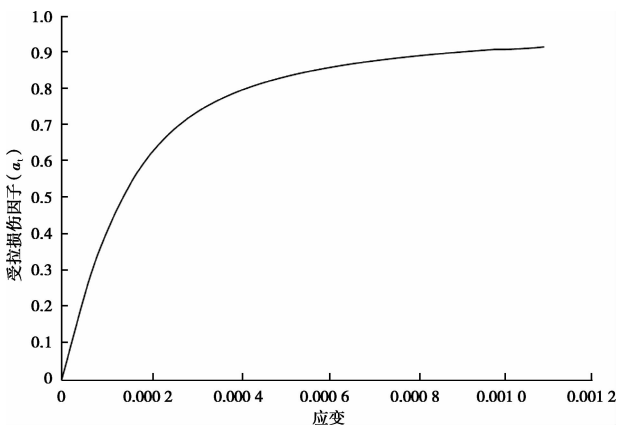


图5 混凝土受拉应变与损伤因子关系图

研究待定的参数少,形式简单,能够反映水泥砂浆材料主要力学特性的本构关系。因此砂浆保护层采用混凝土损伤塑性模型,反映损伤内变量和塑性区的演化,模拟砂浆保护层的裂缝发展过程。

2.4 预应力施加

PCCP管采用张拉高强度的预应力钢丝的方法对管芯混凝土施加初始预应力,极大地提高了PCCP管的承压能力。缠丝工艺采用差速法,即利用应力发生装置控制的放丝速度低于混凝土管的缠丝速度的方式张拉预应力钢丝。为模拟实际制造过程中钢丝的控制张拉缠丝应力,采用降温法对钢丝施加指定预拉应力。降温法是利用材料的热胀冷缩性能,通过对预应力钢丝杆单元实施降温,使钢丝收缩产生环向拉应力。通过降温值的大小不仅可以灵活控制预应力大小,保证施加预应力为恒定值,而且通过改变降温值的大小也能模拟预应力损失的情况。降温值的大小可以根据式(3)计算得出。

$$\Delta t = \frac{F}{\alpha EA}, \quad (3)$$

式中: Δt 为降温值; α 为预应力钢丝的线膨胀系数,取 $1 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$;A为预应力钢丝的截面面积; E 为预应力钢丝的弹性模量。钢丝应力-应变采用理想弹塑性模型,缠丝应力为其抗拉强度的70%,换算得到的钢丝降温值为 -536°C 。

PCCP的钢丝采用螺旋状缠绕,会造成计算与建模的困难,PCCP在实际制作过程中,预应力钢丝上喷涂水泥砂浆,不但可以形成保护层,同时能为钢丝提供一定程度的握裹力,因此假定两相邻的钢丝独立承受荷载。有限元模型中钢丝分布将简化为各自独立的环状缠绕,并维持相同的螺距。预应力钢丝采用杆单元(Truss)建模。为有效反映钢丝应力情况,每环钢丝剖分成100个单元。

3 数值计算结果与分析

3.1 施加预应力

PCCP管在缠绕预应力钢丝的过程中,对混凝土管芯施加了环向压力。计算过程中,随着计算子步骤的叠加,管内壁应力逐渐增大,当预应力达到设计值的70.94%时,内壁混凝土的轴向拉应力达到了混凝土的极限抗拉应力,但管芯未发生拉伸破坏,也没有发生塑性变形。此后,随着计算的继续,管芯内壁产生裂缝,轴向应力重新分布,轴向应力在裂缝处释放,混凝土在裂缝处发生塑性变形且向两侧延伸。图6a)为等效塑性应变(PEEQ)云图,混凝土管芯在插口端200mm左右发生塑性变形,宽度在40~60mm,而且塑性区已深至钢筒内表面,最大等效塑性应变值为 6.57×10^{-5} 。图6b)为DAMAGET云图,图中拉伸破坏因子达到了0.917,已达到拉伸损伤因子的最大值。管芯已被拉伸破坏,在管芯外壁面和插口钢环与钢筒焊接处拉伸破

坏最严重。图 6c) 为对数应变(LE)云图,环向裂缝位于距端部约200 mm 处,即截面突变处向里,呈环向,最大对数应变值为 4.991×10^{-3} 。混凝土的最大拉应变的平均值约为 $200 \times 10^{-6} \sim 400 \times 10^{-6}$ [21],取 300×10^{-6} 为混凝土的极限拉应变,此时裂缝已深至钢筒内壁。上述分析表

明,在施加预应力阶段,环裂在插口端 200 mm 左右已经形成,并已贯穿至钢筒内壁。笔者认为,由于嵌埋钢筒和插口钢环根部在结构上存在截面突变,而该处突变截面压迫管芯内壁混凝土形成应力集中,由于泊松效应,使管芯内壁混凝土承受拉应力而造成环裂现象。

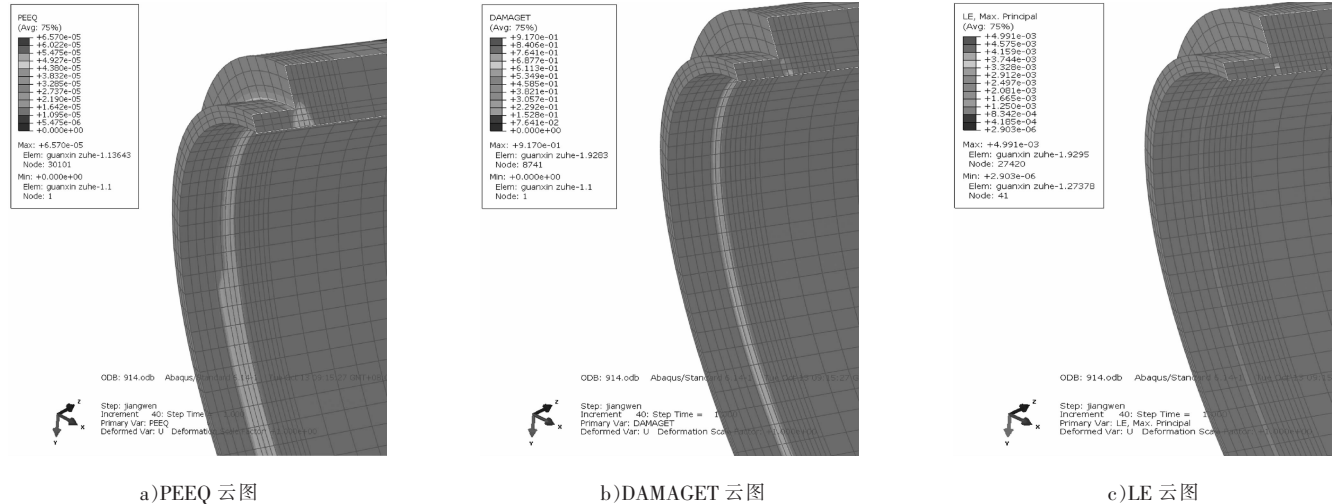


图 6 施加预应力计算结果

3.2 管道吊运

数值模拟表明,PCCP 吊运时插口异型钢板受到较大拉力,导致插口异型钢板与端部管芯混凝土之间产生滑移和脱离现象。由图 7a)可见,在吊运荷载作用下管芯应力重新分布,塑性区进一步扩展。钢筒和插口异型钢板根部焊接处的截面突变,造成此处混凝土塑性变形明显,最大等效塑性应变值达到 8.093×10^{-5} ,使得插口异型钢板与插口端外壁产生滑移。对应插口异型钢板长度(214 mm),图 7b)显示焊缝处的混凝土拉

伸破坏因子为 0.862,此时混凝土沿钢板接缝处已被拉裂,且拉伸破坏区向插口钢环两侧延伸。插口端外侧混凝土全部处于受拉状态,拉应力为 2.56 MPa,拉伸破坏因子为 0.229,表明插口端外侧混凝土已被拉伸破坏。图 7c)显示裂缝最大轴向对数应变值为 4.067×10^{-3} ,相对于施加预应力阶段轴向最大对数应变略有降低,是因为管道吊运时,管芯有向内壁挤压变形位移,但裂缝继续向钢筒内壁扩展。可以预见,随着吊运次数的增加,裂缝深度将进一步扩展。

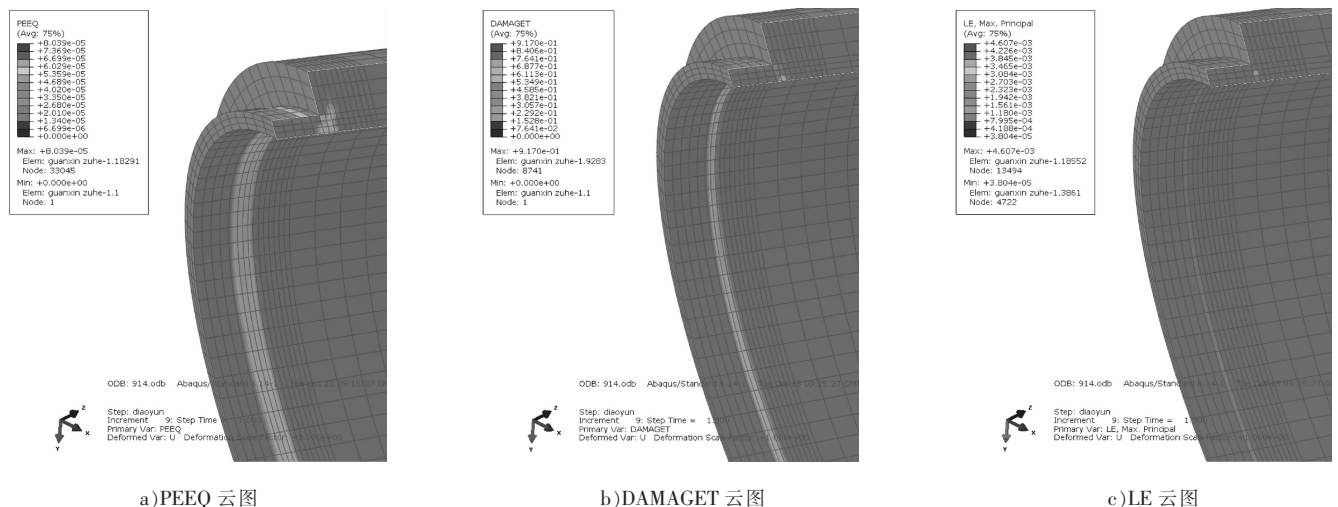


图 7 管道吊运计算结果

3.3 混凝土管芯干缩

在混凝土管芯的干缩效应作用下,插口端塑性应变值增加。图 8a)最大等效塑性应变值为 9.054×10^{-5} , 塑性区的范围明显向两侧发展,宽度达到 60 mm 左右。图 8b)损伤云图表明,混凝土干缩使得管芯内壁受拉伸破坏区明显变大。图 8c)裂缝宽度会进一步发展,最大

对数应变值为 5.078×10^{-3} ,自收缩在管芯内壁产生,会加剧环裂的扩展。在施加预应力阶段,已产生了裂缝,此时环裂两侧的混凝土成为干缩的自由边界,插口端裂缝宽度将不断发展。随放置时间的延长,干缩变形不断增大,裂缝宽度也逐渐加剧。混凝土表层干缩是在内部约束下引发的表面性裂缝。

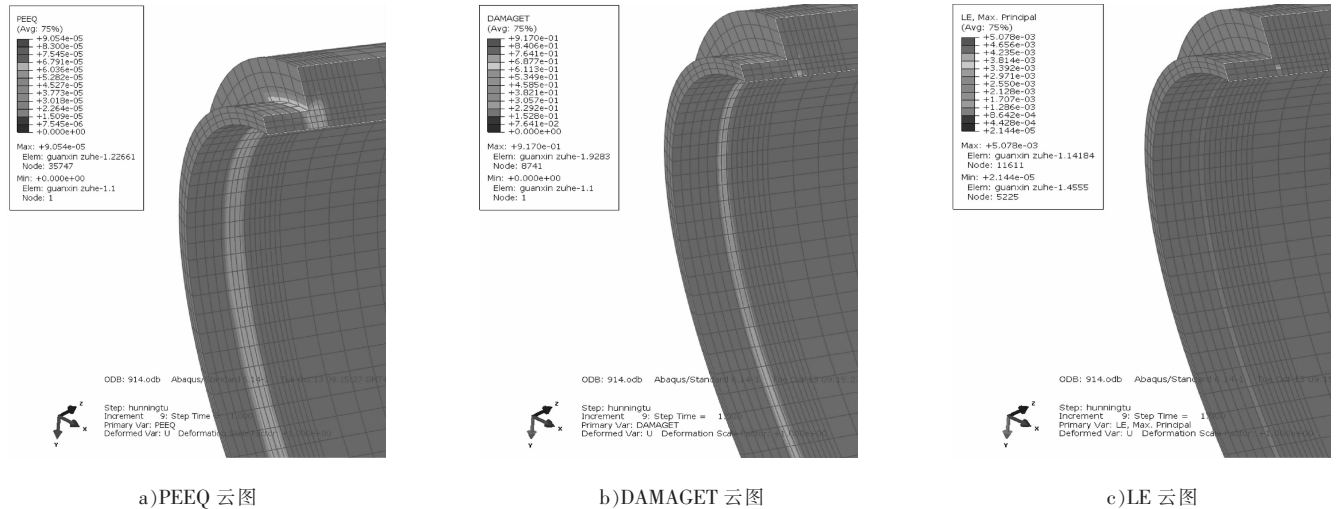


图 8 混凝土干缩计算结果

4 结语

笔者建立了 PCCP 的三维非线性有限元分析模型,模拟了管道在生产 and 存放过程中典型荷载的作用效应,分析了 PCCP 插口端内壁环裂的形成机理。数值模拟表明,由于嵌埋钢筒和插口钢环根部的截面突变所造成的应力集中,使得内壁环裂在缠绕预应力钢丝时就已经产生,在距离插口端 200 mm 左右处发生塑性变形,导致应力重新分布,并且随着预应力的不断施加,塑性区慢慢变大,深至钢筒内壁,裂缝向深处发展。在管道吊运过程中,插口异型钢板与端部管芯混凝土之间产生滑移和脱离,拉伸破坏区变大,导致插口端外侧混凝土被拉伸破坏,环裂宽度逐渐增加。在 PCCP 存放过程中,后期干缩效应造成裂缝两侧混凝土成为干缩的自由边界,裂缝宽度将逐渐加剧。但是,在整个分析过程中,钢筒、预应力钢丝和承插口钢环均未超过其屈服强度。

因为 PCCP 生产工艺复杂,有限元模型并不能完全模拟管道的动态生成过程。例如,立式浇注过程振动压实造成的石子下沉,骨料的不均匀也可能致使插口端混凝土的实际抗拉强度值低于设计值。此外,管体内外的温差也同样加剧环裂的形成。但数值模拟总体与实

际情况符合,机理分析的成果可为环裂预防措施和管道结构安全评价提供科学依据。

参考文献:

- [1] ZARGHAMEE M S, EGGERS D W, OJDROVIC R P. Risk analysis of prestressed concrete cylinder pipe with broken wires [C]. Pipelines, ASCE, 2003: 599-609.
- [2] YOUSSEF G D, THOMAS B. A numerical modeling and a proposal for rehabilitation of PCCP's [C]. Pipelines, ASCE, 2001: 1-8.
- [3] GRAHAM E C B, PETER P. Measurement and analysis of PCCP wire breaks, slips and delaminations [C]. Pipelines, ASCE, 2010: 1016-1024.
- [4] 张树凯. 预应力钢筒混凝土管发展回顾与前景展望[J]. 混凝土与水泥制品, 2007(2): 25-28.
- [5] 孙绍平, 王贯明. 预应力钢筒混凝土管特性[J]. 市政技术, 2006, 24(2): 121-125.
- [6] 窦铁生, 燕家琪. 预应力钢筒混凝土管(PCCP)的破坏模式及原因[J]. 混凝土与水泥制品, 2014(1): 29-33.
- [7] 国务院南水北调工程建设委员会办公室建设管理司. 预应力钢筒混凝土管(PCCP)工程[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012.
- [8] 寇建章. 4 m 直径 PCCP 管芯插口端外表面裂缝成因分析[J].

山西水利科技,2007,8(3):31-33.

- [9] 苏州混凝土水泥制品研究院,苏州中材建筑建材设计研究院. 预应力钢筒混凝土管标准:GB/T 19685-2005[S]. 北京:中国标准出版社,2005.
- [10] American Water Works Association. Standard for prestressed concrete pressure pipe[S]. US:US-ANSI,2007.
- [11] 沈捷. 超大口径PCCP结构安全性能试验和数值分析研究[D]. 南京:南京水利科学研究所,2010.
- [12] 胡少伟,沈捷,王东黎,等. 超大口径预埋裂缝的预应力钢筒混凝土管结构分析与试验研究[J]. 水利学报,2010,41(7):876-882.
- [13] 余洪方,刘红飞. 预应力钢筒混凝土管裂缝产生机理及对策研究[J]. 混凝土与水泥制品,1996(6):40-43.
- [14] 刘卿春,张建,潘卫国. 埋置式预应力钢筒混凝土管插口环裂的预防[J]. 混凝土与水泥制品,2006(1):22-23.
- [15] 唐连涛. PCCP插口内壁混凝土环裂形成机理及控制措施研究[J]. 水利规划与设计,2015(5):67-69.

(上接第118页)

缓,因此各个城市在构建低影响开发雨水系统时,需要考虑由此对经济效益造成的影响。当部分城市缺乏详细的水文资料时可以参考降雨条件相似的城市进行取值,或者参考《指南》中我国大陆地区年径流总量控制率分区图进行取值。MET

参考文献:

- [1] 李俊奇,王文亮,车伍,等. 海绵城市建设指南解读之降雨径流

(上接第121页)

3)生化池的底板、壁板、顶板采用控制裂缝宽度性能较好的变形钢筋,钢筋按照“宁细勿粗,宁密勿疏”的原则配置,双层双向拉通布置。

5 结语

该工程中生化池的平面尺寸大、深度深,在结构设计时应结合工艺专业的功能要求合理布置结构的受力体系,力求做到经济合理;生化池的地基基础采用刚性桩基础,能同时承受上部结构传来的竖向压力和地下水产生的部分浮力;进行抗浮设计时,在结构构件尺寸满足各自受力要求的情况下,如果自重与浮力相差较大时则应考虑采取辅助抗浮措施,而不应盲目加大构件尺寸来增加自重,从而造成浪费;对于生化池这样的超大型水池结构,为避免渗漏应尽量不设置贯通的伸缩缝,但需采取其他有效的技术措施来避免或减少混凝土的收缩和温度效应引起的开裂;对于

- [16] 张成军,陈尧隆,李宇,等. 大直径预应力钢筒混凝土管道裂缝产生机理与防治研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2005,7(33):93-98.
- [17] 梅明荣,任青文. 混凝土结构的干缩应力研究综述[J]. 水利水电科技进展,2002,22(3):59-62.
- [18] 中国建筑科学研究院. 混凝土结构设计规范:GB 50010-2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [19] 乐运国,李遇春,晏思聪,等. 高强度混凝土I型裂纹损伤断裂判据研究[J]. 水电站设计,1999,15(1):34-38.
- [20] 常留红,陈建康. 单轴压缩下水泥砂浆本构关系的试验研究[J]. 水利学报,2007,38(2):217-220.
- [21] 陈惠发,A·F·萨里普. 混凝土和土的本构方程[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2004.

收稿日期:2016-01-21

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51378088);中央高校基本科研业务费专项资金(DUT14ZD202)

作者简介:钟胜,男,在读硕士研究生,研究方向为埋地管道结构安全。

总量控制目标区域划分[J]. 中国给水排水,2015,31(8):6-12.

- [2] 潘国庆,车伍,李俊奇,等. 中国城市径流污染控制量及其设计降雨量[J]. 中国给水排水,2008,24(22):6-12.
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建(试行)[EB/OL]. (2014-11-13)[2016-02-20]. <http://jz.docin.com/p-959179319.html>.

收稿日期:2016-02-29

基金项目:2015年福建省住房和城乡建设系统科学技术计划项目(2015-K-21);2015年福州大学横向项目(00501552)

作者简介:鄢斌,男,在读硕士研究生,主要研究方向为城镇雨洪控制。

像本工程这样的大面积基坑,周围又没有重要建筑物,对位移控制要求不高,这种情况下优先考虑采用可进行敞开式挖土的基坑支护方式,并综合考虑基坑深度、地质条件及工期和造价等因素,选用最合适的支护方案。MET

参考文献:

- [1] 中国建筑科学研究院,等. 建筑地基基础设计规范:GB 50007-2011[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011.
- [2] 刘国彬,王卫东. 基坑工程手册[M]. 2版. 北京:中国建筑工业出版社,2009:339.
- [3] 中国工程建设标准化协会. 给水排水工程钢筋混凝土水池结构设计规程:CECS 138-2002[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2003.

收稿日期:2016-03-19

作者简介:程威,男,工程师,硕士,主要从事市政工程结构及岩土方面的设计工作。