

引汉济渭二期工程输水隧洞盾构开挖过程 参数化数值模拟方法研究

苏岩¹, 刘彪², 王正中², 董鹏¹, 刘铨鸿², 杨诚¹

(1. 陕西省引汉济渭工程建设有限公司, 陕西 西安 710011;

2. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 引汉济渭二期工程输水隧洞开挖过程及支护方案的安全性对于隧洞工程施工、运营阶段的安全性至关重要。数值模拟方法是预判输水隧洞开挖过程、支护过程的隧洞围岩及支护结构受力性能、安全性的重要手段。文章的目的是提出一种简化、通用、可靠的参数化数值模拟方法。将 Python 语言应用于隧洞开挖过程的数值模拟中, 基于 Python 语言编制隧洞开挖过程的代码, 代替双手完成复杂的建模过程。利用本文提出的方法分析了模型横向网格尺寸对开挖支护后管片环向应力的影响, 并发现管片环向应力不受横向网格尺寸影响。文章所提出的基于编程语言的参数化建模方法具有零错误、高效的特点, 可用于类似隧洞工程的开挖过程的数值模拟, 对隧洞工程的安全性分析具有实用价值。

关键词: 输水隧洞; 盾构施工; Python 语言; 参数化数值模拟

中图分类号: U455.43

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2022)04-0014-06

Parametric Simulation Method of Shield Tunnel Excavation Process in Hanjiang-to-Weihe River Water Diversion Project

SU Yan¹, LIU Biao², WANG Zhengzhong², DONG Peng¹, LIU Quanhong², YANG Cheng¹

(1. Hanjiang-to-Weihe River Valley Water Diversion Project Construction Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710011, China;

2. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The safety of the excavation process and support scheme of the water conveyance tunnel of the Hanjiang-to-Weihe River Water Diversion Project is very important for the safety of the tunnel engineering construction and operation stages. The numerical simulation method is an important way to predict the mechanical performance and safety of the surrounding rock and the supporting structure during the excavation and support process. The purpose of this paper is to propose a simplified, general and reliable parametric numerical simulation method. In this paper, Python language was applied to the numerical simulation of the tunnel excavation process, and the code of the tunnel excavation process is compiled based on the Python language to accelerate the complex modeling process. The method proposed in this paper is used to analyze the influence of the transverse mesh size of the model on the hoop stress of the lining after excavation and support, and it is found that the hoop stress of the lining is not affected by the transverse mesh size. The parametric modeling method based on programming language proposed in this paper has the characteristics of zero error and high efficiency. It can be used for the numerical simulation of the excavation process of similar tunnel engineering, and has practical value for the safety analysis of tunnel engineering.

Keywords: tunnel for water delivery; shield construction; Python language; parametric simulation

陕西省以秦岭为界分为长江流域和黄河流域, 处于黄河流域的关中地区和陕北地区存在季度缺水

问题, 且长江流域水资源丰富且不能被充分利用, 目前的水资源配置无法满足陕西省经济发展的需

求^[1]。为缓解关中渭河沿线城市和工业用水短缺的问题,引汉济渭工程被提出,该工程建成后可为西安、咸阳、宝鸡、渭南4个城市、沿渭河两岸11个县及6个工业园提供各类用水^[2]。引汉济渭二期输配水工程是引汉济渭工程的重要组成部分,由黄池沟配水枢纽、南干线、北干线及相应的输水支线组成^[3-4]。二期工程从关中配水节点黄池沟起,输水干线东到渭南市华州区,西到杨凌示范区,南到郿邑区,北到富平县,输配水区域东西长约163 km,南北宽约84 km,总面积约1.4万km²。图1为引汉济渭二期工程总平面布置示意图。



图1 引汉济渭二期工程总平面布置示意图

南干线黄池沟至灞河段全长102.07 km,由隧洞、倒虹、渡槽、管桥、箱涵及分退水设施组成。南干线工程主要穿越秦岭岭北中低山区、山前洪积扇区、河谷阶地、黄土台原四大地貌单元,出露地层主要为下元古界宽坪群变质岩、燕山期花岗岩、新近系沉积岩及四系松散堆积层。地下水以基岩裂隙水、第四系松散岩类孔隙水、新近系碎屑岩类裂隙孔隙水为主。黄午隧洞、神禾塬隧洞、少陵塬隧洞和白鹿塬隧洞这四段隧洞总长90.05 km,占南干线近90%。

神禾塬隧洞、少陵塬隧洞为黄土隧洞,白鹿塬隧洞为泥岩、砂砾岩隧洞。鉴于黄土隧洞及泥岩隧洞成洞条件均十分困难,且隧洞埋深不大,地表有村落房屋等建筑物,在高地下水位的饱和性黄土洞段及泥砂岩洞段,常规钻爆法施工风险极高,因此,拟采用盾构法施工。引汉济渭二期工程中神禾塬隧洞、少陵塬隧洞、白鹿塬隧洞处于高地下水且地质条件复杂的黄土、泥岩环境中,在国内外非常罕见,缺乏工程经验、相关理论和设计方法,采用盾构法对这类高地下水复杂地层隧洞施工的安全性有待进一步研究。

为了明确引汉济渭二期工程输水隧洞的安全性,必须在施工之前对引汉济渭二期工程输水隧洞的安全性进行深入研究,而数值模拟方法是进行输

水隧洞安全性预测的重要手段。随着软件、硬件及算法的发展,数值模拟方法在水利工程领域得到了广泛认可^[5-9]。输水隧洞的开挖过程数值模拟较为复杂,采用一般的方法进行数值模拟存在工作效率低、出错率高的缺点。为解决这一问题,本文将编程语言应用于输水隧洞开挖过程的数值模拟中,以期提出一种高效、可靠、通用的数值模拟方法,从而提高输水隧洞数值模拟的效率。

1 Python 在 Abaqus 二次开发中的应用

Abaqus 具有强大的非线性数值分析功能,含有8类共562种单元,足以对水利工程中的问题进行求解^[10]。对于输水隧洞而言,需要能够进行流固耦合的数值模拟,而其中提供了能够考虑渗流与应力耦合的单元C3D8RP。因此,学者们^[11-14]利用Abaqus对隧洞开挖进行了相关研究,证明了其在隧洞工程中的可靠性。

Python语言目前应用于各个领域,且Abaqus的多个模块基于Python语言编制而成,因此,Python语言可以很好地应用于Abaqus的各个过程。学者们已经运用Python语言对Abaqus进行了部分研究,如郭玲等^[15]将Python语言应用于薄壁管弯曲起皱的研究中;夏敏等^[16]利用Python语言对Abaqus计算平台进行二次开发,建立了混凝土框架火灾受损分析系统。这些研究都表明了将Python语言与工程结构领域的数值模拟软件相结合能够极大提高数值模拟的效率。

鉴于输水隧洞开挖过程的复杂性,并基于Abaqus计算平台解决非线性问题的能力以及Python语言在Abaqus中应用的优势。本文将基于Abaqus计算平台,利用Python语言提出输水隧洞开挖过程的参数化分析方法,以提高输水隧洞开挖过程数值模拟的效率,为解决引汉济渭二期工程输水隧洞安全性面临的不确定性问题做出贡献。

2 Abaqus 中隧洞开挖建模过程

隧洞开挖的数值模拟基本过程包括前处理、计算及后处理,其中操作复杂且占用时间较多的在于前处理过程。前处理过程基本包括以下步骤:

(1) 建立零件。首先根据隧洞尺寸绘制横截面的草图并对其进行挤出,即可建立隧洞开挖模型的整体几何模型。由于隧洞的开挖几何模型、开挖过程中应变、应力及变形等反应具有对称性,因此,本文采用1/2的模型进行开挖过程的有限元分析,采用简化模型可以提高分析效率。本文在绘制草图的

同时对横截面进行了切割,分别按照管片外径、灌浆圈外径、距洞较近的圆、圆心与方形角点连线对横截面草图进行切割,如图 2 所示。切割后可保证在内部存在圆形隧洞的长方体模型在网格划分时能够得到质量较好的网格。

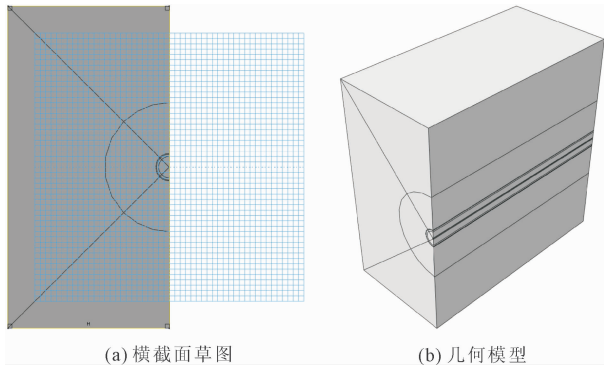


图 2 隧道草图及切割情况

(2) 定义材料并指定截面。为几何模型指定材料和截面属性。定义材料时需要指定岩土体的密度、弹性模量、孔隙度、本构模型等;同时需要定义衬砌的弹性模量、泊松比、密度等参数、盾构的弹性模量、泊松比、密度等参数、注浆料弹性模量、泊松比、密度等参数。在定义好材料属性之后需定义截面属性,并将截面属性指定给各部件。

(3) 装配零件。将零件组装成分析用的模型。

(4) 设置分析步。根据分析目标设置不同的分析步骤和分析方法,首先,需要定义第一个分析步,即地应力平衡分析步;其次,需要定义开挖过程的分析步,对于开挖过程需要利用生死单元技术设置用于单元移除与单元重生的几十个甚至上百个分析步,每一个分析步向前掘进 1 管片的距离为纵向长度。在每一步选择单元的过程中,不仅要求精准选择每一步要移除单元,而且要求同时精准选择要激活的单元,此过程中若出现一个单元的选择错误将导致整个分析过程的失败。

(5) 设置接触。单元移除和单元激活采用接触行为中的 model change 属性定义,每一个分析步向前掘进一个管片的长度,其过程需要设置两个接触,一个接触行为是移除,另一个接触行为是激活。第一步的地应力平衡分析步中需要设置移除隧洞岩土体以外的其他所有单元,即需要利用 GUI 在关键字中添加 * model change, remove 字符^[17],并列需要移除的单元集合,Abaqus 在第一步计算地应力平衡式就会不计入这些被移除的单元;其次,对于后续开挖分析步的每一步都需要设置两个接触,即移除该步所需要开挖的土体单元和管片单元,随后添加

该步所对应的衬砌单元与注浆料单元。对于某一步来说,移除与激活接触行为的设置看似简单,然而当开挖过程较多时,这两个移除与激活接触行为的设置过程就变得非常复杂。其原因是在移除与激活时需要编写所要处理的单元集合名称,这就需要在设置移除与激活接触行为之前先定义需要被处理的集合,这些集合的数量可能上百个。集合的定义过程极易出错,移除与激活接触行为字符的编写过程也极易出错,且要在不同的分析步中移除不同的接触,同时激活不同的接触。可见,这一步的过程非常复杂,且容易出错。

(6) 施加荷载及边界条件。首先,需要在初始条件中设置地应力及孔隙水压力;其次,在第一步中需要施加重力荷载和上部覆土压力,在随后的分析步中保持不变;最后,需要根据实际情况设置模型的边界条件。对于法线方向为 X 方向的两个面限制 X 方向的位移,对于法线方向为 Y 方向的两个面限制 Y 方向的位移,对于法线方向为 Z 方向的两个面限制 Z 方向的位移。

(7) 设置并划分网格。根据分析目标设置网格划分规则,网格大小、单元类型等,并对网格进行划分。对开挖区域周围较近的土体采用较细的网格,在操作时需切割出细化网格的区域,这一步可以在(1)中建立部件的草图中完成,也可在装配以后完成。随后需对不同区域的网格设置尺寸,本文中对开挖方向设置的网格大小均为管片的宽度,目的是与实际施工过程相对应,即开挖一步正好完成该步管片的施工。在模型的横向,距洞较近的区域设置较密的网格,在距洞较远的区域设置相对较大的网格,这样即可保证计算精度,亦可保证计算速度。图 3 为划分网格后的盾构隧洞有限元模型。

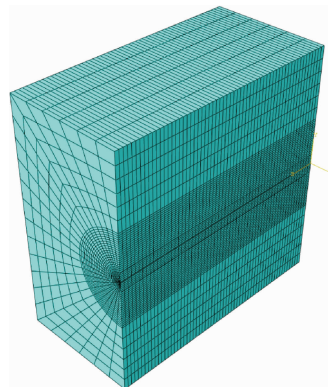


图 3 盾构隧洞有限元模型

(8) 检查模型并提交计算。利用数据检查功能进行模型检查,检查无误后提交计算。

3 基于 Python 语言的隧洞开挖过程参数化建模方法

3.1 手动建模存在的问题

对于隧洞开挖过程的数值模拟,如果模型几何尺寸发生变化,则上述过程中(1)需要重新修改尺寸,且将导致(5)中定义的数百个集合都需要重新被选择和定义,同时也导致(7)中的网格发生变化和重新划分。其中,单独就(5)而言,重新定义上百个集合、对不同集合在不同的分析步设置为移除或激活的工作量是非常大的,再加上其他步骤的工作量,这是非常占用时间的。且由于接触的定义极为复杂,所以出错率非常高。以上过程还只是说要修改几何尺寸的情况,并没有考虑其他参数的修改。

针对上述复杂问题,非常有必要提出一种可靠且通用的数值模型,从而解决出错率高、分析效率低的问题。为此,本文将 Python 语言应用于 Abaqus 计算平台中,以提出一种高效、可靠的隧洞开挖过程数值模拟方法。

3.2 基于 Python 语言的隧洞开挖建模过程

第2节所述 GUI 界面操作的各个步骤,均可通过 Python 语言代替,Python 语言建模的所有操作可在几秒内完成且错误率为0,可解决界面操作的过程复杂且出错率高。下文将详细解释第2节每一步通过 Python 编程实现的方法,并给出部分关键的代码。

(1) 建立零件

Suidong - Moxing = mdb. models['Suidong - Moxing']

建立草图: Suidong - Moxing. ConstrainedSketch (name = 'sketch - 1', sheetSize = 50.0)

绘制矩形: Sd_MX. sketches['sketch - 1']. rectangle(point1 = (-模型高, 模型宽), point2 = (0.0, -模型高))

零件类型和名称: Sd_MX. Part(dimensionality = THREE_D, name = 'Part1_Yantuti', type = DEFORMABLE_BODY)

挤出三维模型: Sd_MX. parts['Part1_Yantuti']. BaseSolidExtrude (depth = L, sketch = Sd_MX. sketches['sketch - 1'])

del Sd_MX. sketches['sketch - 1']

(2) 定义材料并指定截面

命名岩土体材料: Sd_MX. Material(name = 'Tu')

Sd_MX_Tu = Sd_MX. materials['Tu']

定义岩土体密度: Sd_MX_Tu. Density (table = ((1590.0,),))

弹模和泊松比: Sd_MX_Tu. Elastic (table = ((1.5e8, 0.125),))

摩尔 - 库仑模型: Sd_MX_Tu. MohrCoulombPlasticity (table = ((18.0, 0.0),))

Sd_MX_Tu. mohrCoulombPlasticity. MohrCoulombHardening (table = ((300000.0, 0.0),))

Sd_MX_Tu. mohrCoulombPlasticity. TensionCutOff (dependencies = 0, table = ((0.0, 0.0),), temperatureDependency = OFF)

设置渗透系数: Sd_MX_Tu. Permeability (inertialDragCoefficient = 0.142887, specificWeight = 10000.0, table = ((1.1e - 12, 0.67),))

体积模量: Sd_MX_Tu. PorousBulkModuli (table = ((0.0, 2e9),))

衬砌、浆料及盾构机均采用弹性材料,设置方法与岩土体相同。

指定截面: Cell1 = Sd_MX. parts ['Part1_Yantuti']. cells [:]

Sd_MX. parts ['Part1_Yantuti']. SectionAssignment (offset = 0.0, offsetField = "", offsetType = MIDDLE_SURFACE, region = Cell1,), sectionName = 'JM1', thicknessAssignment = FROM_SECTION)

(3) 装配零件

Sd_MX. rootAssembly. Instance (dependent = ON, name = 'Part1_Yantuti - 1', part = Sd_MX. parts ["Part1_Yantuti"])

(4) 设置 Step

地应力平衡分析步: Sd_MX. GeostaticStep (name = 'Step - DPH', previous = 'Initial')

开挖分析步 1: Sd_MX. SoilsStep (cetol = None, end = None, initialInc = 3600.0, name = 'Step - 1', nlgeom = ON, previous = 'Step - DPH', timeIncrementationMethod = FIXED, timePeriod = 3600.0, utol = None)

(5) 设置接触

首先,定义集合: 编制单元选择代码和循环定义集合代码将每步需要操作的单元定义为名称规则的集合, Sd_MX. rootAssembly. Set (elements = 所选择的单元, name = 集合名称);

其次,通过修改关键词定义每一步要移除的单

元:Model change, remove;

同时,通过修改关键词定义每一步要激活的单元集合:Model change, add;

(6) 施加荷载及边界条件

施加重力:Sd_MX. Gravity(comp3 = ±重力加速度, createStepName = 'Step - DPH', distributionType = UNIFORM, field = "", name = 自定义名称)

施加顶部覆土压力:Sd_MX. Pressure(amplitude = UNSET, createStepName = 'Step - DPH', distributionType = UNIFORM, field = "", magnitude = 压力大小, name = 名称, region = 压力作用区域)

(7) 设置并划分网格

定义边种子:Sd_MX. rootAssembly. seedEdgeBySize(constraint = FINER, deviationFactor = 0.1, edges = 边, minSizeFactor = 0.1, size = 网格尺寸)

划分网格:Sd_MX. rootAssembly. generateMesh(regions = (需要划分网格的部件名称,))

(8) 检查模型并提交计算

mdb. jobs ['作业名称']. submit(consistencyChecking = OFF, datacheckJob = True)

将上述过程编制成 Python 文件,对于不同的模型只需要修改不同参数的数值大小,然后在 Abaqus 平台中运行该文件就可以在数秒内完成复杂的隧洞开挖支护的建模工作。更重要的是采用 Python 进行建模具有零错误率的特点,且应用时只需要修改某些参数的数值就可以迅速完成数值模型的建立及计算过程。

通过对比可知,手动建模操作过程繁琐、工作效率低、准确率差,而基于 Python 语言的建模方法具有可重复性高、工作效率高、零出错率的特点。因此,基于 Python 语言的建模方法在复杂的隧洞开挖问题中的应用前景广阔。

4 参数化模拟方法的应用算例

本文以白鹿原隧洞为例,采用上述方法分析洞周围横向网格尺寸变化对盾构隧洞开挖与支护过程的影响,以验证本文所述方法的可靠性。首先,利用参数化模拟方法建立不同横向网格尺寸的隧洞开挖有限元模型;其次,利用各模型进行开挖和支护的全过程模拟,对比结果的差异。

4.1 不同横向网格尺寸的有限元模型

本文所建立的不同横向网格尺寸的有限元模型如图 1 所示,所有模型中开挖方向网格尺寸与管片

宽度相同,洞径方向网格分为两个区域,即距洞较远处的粗网格区域和距洞较近的细化网格区域。图 4(a)中的黄色区域即为细化网格区域,图 4(b)—图 4(f)模型中细化区域的网格尺寸分别为 20 cm、50 cm、80 cm、110 cm、140 cm,所分析的五个模型只有细化区域网格尺寸变化,其他参数均相同。

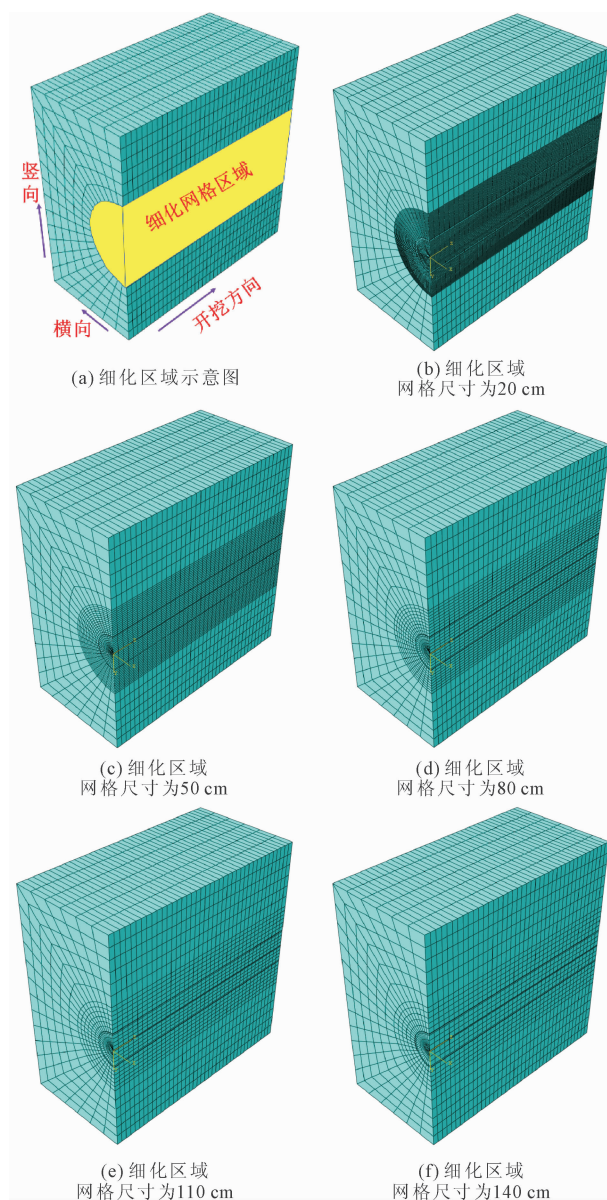


图 4 细化区域不同网格尺寸的有限元模型

4.2 有限元分析结果

盾构隧洞开挖与支护有限元分析完成后取出位于距离模型前端 30 m 处的管片,对比不同细化网格尺寸下该处衬砌结构的应力分布情况,结果如图 5 所示。图 5(a)为所分析的管片位置的示意图,图 5(b)—图 5(f)为细化区域不同网格尺寸时管片应力的分布情况。

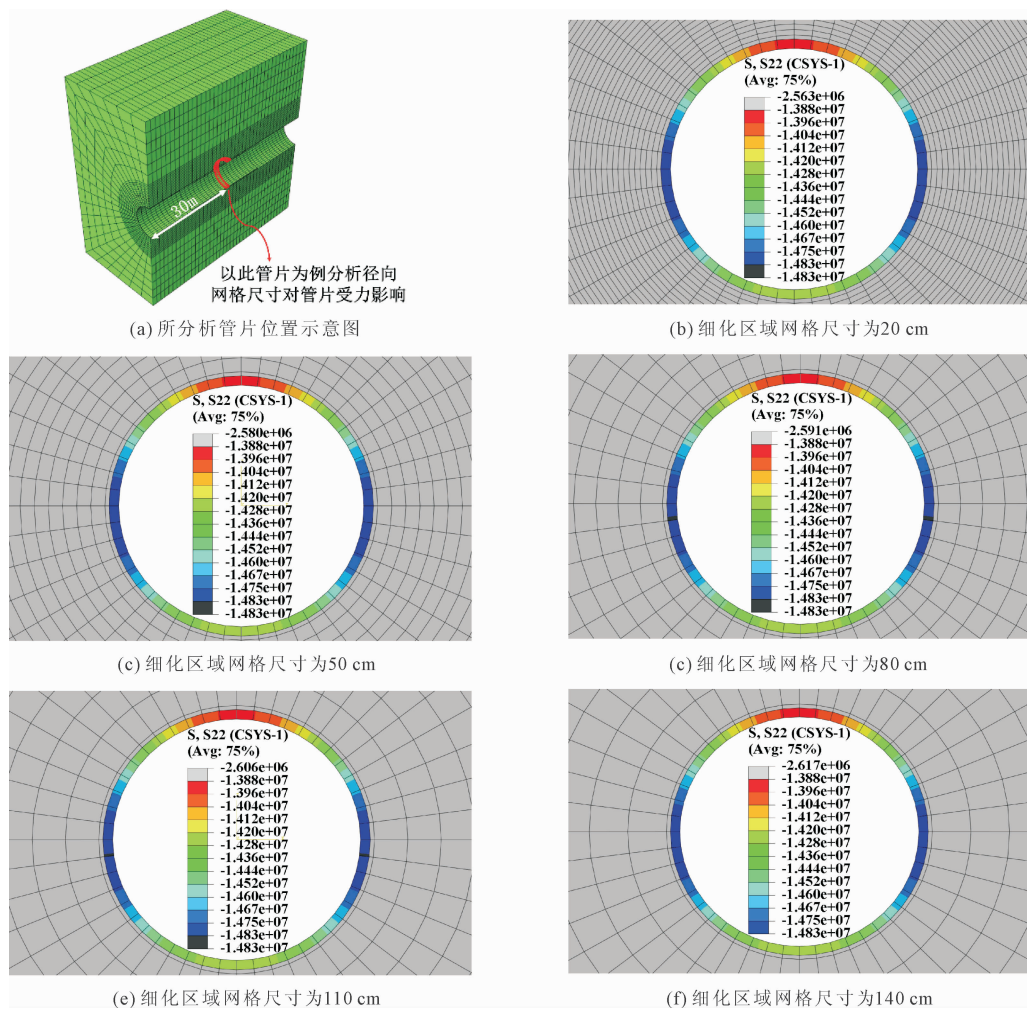


图 5 不同横向网格尺寸时开挖并支护后距端面 30 m 处管片应力

从以上分析结果可以看出,当洞周围细化区域网格尺寸分别为 20 cm、50 cm、80 cm、110 cm、140 cm 时,开挖支护后的管片结构应力分布没有变化。然而,围岩压应力随着网格尺寸变小呈减小趋势,且变化幅度不大。当细化区域网格尺寸为 20 cm、50 cm、80 cm、110 cm、140 cm 时,围岩最大压应力分别为 2.563 MPa、2.580 MPa、2.591 MPa、2.606 MPa、2.617 MPa。可见,洞周围细化区域网格尺寸对开挖支护后管片与围岩受力几乎没有影响。上述算例也证明了本文所提参数化分析方法在进行参数敏感性分析方面的优势,该方法大幅减少了复杂的重复性工作,提高了工作效率和准确性。

5 结 论

为解决引汉济渭二期工程输水隧洞开挖过程、支护过程的隧洞围岩及支护结构受力性能、安全性分析中所面临的复杂问题,本文将 Python 编程语言应用于隧洞开挖过程的数值模拟中。本文基于 Python 语言编制了隧洞开挖过程的代码,可代替界面

中手动地操作以完成复杂和重复性的建模过程。算例表明本文方法能够极大提高隧洞安全性评价的工作效率,可为加快引汉济渭二期工程的进度做出贡献,能够用于类似隧洞工程的数值模拟,具有实用价值和参考意义。

参考文献:

- [1] 张永永,黄强,姜瑾,等.陕西省引汉济渭工程受水区水资源优化配置研究[J].西安理工大学学报,2011,27(2):165-170.
- [2] 杜小洲.引汉济渭秦岭输水隧洞关键技术问题及其研究进展[J].人民黄河,2020,42(11):138-142.
- [3] 苗洲,柯啸,牛闻.三河口水利枢纽泄洪底孔事故闸门振动分析[J].陕西水利,2021(8):9-13.
- [4] 张文乐,田睿,王启国.输水隧洞水力过渡过程计算[J].水利规划与设计,2021(12):129-134.
- [5] 周辉,高阳,张传庆,等.考虑围岩衬砌相互作用的钢筋混凝土衬砌数值模拟[J].水利学报,2016,47(6):763-771.

0.584 37, 0.585 74, 0.587 14。

(2) 由于咸阳市灌溉用水利用系数开始进行测算分析时段相对较短,年度统计资料时间序列不长,因此灰色 Verhulst 改进模型预测的灌溉水利用系数结果并不能严格代表长期的变化趋势,需要进一步考虑多因素的影响建立多元模型来探究各因素与灌溉水利用系数的关系,从而得到更科学合理的预测结果。

参考文献:

- [1] 佟 巍. 我国水资源现状[J]. 才智, 2012(6): 215.
- [2] 张晓松. 我国人均水资源为世界平均水平 1/4[J]. 国土经济, 2001(1): 46.
- [3] 徐义军, 刘思妍, 姚帮松, 等. 农田灌溉水有效利用系数研究进展[J]. 湖南水利水电, 2020(3): 64-68.
- [4] 李莹莹, 赵向豪. 区域农业用水效率评价指标体系研究[J]. 节水灌溉, 2017(6): 83-84, 89.
- [5] 陈 伟, 吴耀武, 姜素华, 等. 基于累积式自回归动平均法和反向传播神经网络的短期负荷预测模型[J]. 电网技术, 2007(3): 73-76.
- [6] 张 成, 滕 欢, 付 婷. 基于灰色离散 Verhulst 模型理论的电力中长期负荷预测研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(4): 45-49.
- [7] 邓聚龙. 灰色系统综述[J]. 世界科学, 1983(7): 1-5.
- [8] 熊支荣, 李珍照. 灰色系统理论方法在观测资料分析

中的应用[C]//中国水力发电工程学会全国水工建筑物观测情报网第三届全网大会暨大坝安全监测学术会, 中国水力发电工程学会, 天津, 1990.

- [9] 郭晓君, 刘思峰, 方志耕. 具自忆性的改进灰色 Verhulst 模型研究及应用[J]. 系统工程, 2014, 32(4): 137-141.
- [10] 刘 侃, 田鑫鑫. 基于辛普森积分公式优化的灰色预测模型[C]//第十三届中国系统仿真技术及其应用技术学术年会, 中国自动化学会, 中国系统仿真学会, 2011.
- [11] 丁亦非, 史 莹, 王佩玲. 农业发展现状——以咸阳市为例[J]. 江西农业, 2018(18): 109-110.
- [12] 蔡晓东, 陈新明, 李普超. 咸阳市农田灌溉水有效利用系数测算与分析[J]. 节水灌溉, 2018(1): 82-85, 89.
- [13] 李军军, 张建涛. 回归模型可决系数的可决性研究[J]. 统计与决策, 2005(11): 19-20.
- [14] 李军红, 李付庆, 范建民. 统计学[M]. 南京: 南京大学出版社:, 2020.
- [15] 赵 玲. 基于马尔可夫链的道路交通事故预测研究及应用[D]. 西安: 长安大学, 2013.
- [16] 顾 贺. 甘肃农业灌溉用水有效利用系数测算及阈值分析研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2014.
- [17] 陕西省统计局, 国家统计局陕西调查总队. 陕西统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.

(上接第 19 页)

- [6] 刘国庆, 肖 明, 杨 阳, 等. 跨断层水工隧洞地震响应数值模拟分析方法[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2018, 45(11): 140-148.
- [7] 刘国庆, 肖 明, 陈俊涛, 等. 强震区隧洞洞口段地震响应数值模拟研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49(11): 2804-2812.
- [8] 贡 力, 王 鸿, 杨轶群, 等. 流冰对输水隧洞衬砌的撞击影响研究[J]. 振动与冲击, 2021, 40(4): 72-80.
- [9] 蔡小林, Swoboda G, 陈文胜, 等. 火灾下隧道衬砌的安全设计[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(S2): 3805-3811.
- [10] 朱向荣, 王金昌. ABAQUS 软件中部分土模型简介及其工程应用[J]. 岩土力学, 2004(S2): 144-148.
- [11] 都 辉, 任旭华, 张继勋, 等. 基于 ABAQUS 的地下隧洞开挖及围岩稳定性分析[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2014, 36(2): 28-32.
- [12] 金 鹏, 谢立全, 蒋博闻, 等. 跨层引水隧洞长期稳定

性的数值分析[J]. 现代隧道技术, 2018, 55(S2): 916-921.

- [13] 周 利, 苏 凯, 周亚峰, 等. 高压水工隧洞透水衬砌渗流-应力-损伤耦合分析方法研究[J]. 水力学学报, 2018, 49(3): 313-322.
- [14] 伍国军, 陈卫忠, 谭贤君, 等. 饱和岩体渗透性动态演化对引水隧洞稳定性的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(11): 2172-2182.
- [15] 郭 玲, 杨 合, 邱 晞, 等. 基于 Python 的 ABAQUS 后处理研究开发及其在薄壁管数控弯曲中的应用[J]. 塑性工程学报, 2007(5): 32-37.
- [16] 夏 敏, 余江滔, 陆洲导. 受火后混凝土框架基于纤维模型的软件开发与试验验证[J]. 工程力学, 2016, 33(11): 163-173.
- [17] 孙 冰, 丁德馨, 曾 晟, 等. 钢筋混凝土叠合结构二次受力过程数值分析[J]. 华中科技大学学报(城市科学版), 2008(4): 260-263.