

文章编号: 1000-4750(2016)02-0224-08

基于混合模型方法的 大型输水隧道水锤冲击响应数值分析

楼云锋, 曹 源, 杨颜志, 金先龙

(上海交通大学机械系统与振动国家重点实验室, 上海 200240)

摘 要: 针对大型输水隧道水锤分析响应分析中由于超大计算规模和非线性强流-固耦合计算造成的数值计算困难, 该文提出将混合模型方法应用到大型衬砌输水隧道水锤冲击响应的数值模拟中, 通过该方法不仅可以得到输水隧道全程水锤压力, 也可以得到关键区域衬砌环管片结构响应。模型中流场部分通过 FLUENT 计算得到流场节点压力和速度, 然后通过初始条件或边界信息施加到结构部分进行 LS-DYNA 计算, 水锤计算时流-固耦合通过基于 ALE(Arbitrary Lagrangian-Eulerian)描述的罚函数实现。该文对上海某大直径双线输水隧道在水锤作用下的结构响应进行了分析, 结果呈现了水锤压力在长距离输水隧道内的传播以及对衬砌结构的影响。

关键词: 混合模型; 输水隧道; 流-固耦合; 水锤; 结构分析

中图分类号: U459.6 **文献标志码:** A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2014.07.0577

APPLICATION OF HYBRID MODELING METHOD TO SIMULATE WATER HAMMER IMPACTS IN ULTRA-LARGE WATER CONVEYANCE TUNNEL

LOU Yun-feng, CAO Yuan, YANG Yan-zhi, JIN Xian-long

(State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Because of the ultra-large scale calculation and strong nonlinear calculation of fluid structure interactions (FSIs), the numerical simulation and analysis of water hammer impacts in an ultra-large water conveyance tunnel are difficult. The hybrid modeling method is used to simulate water hammer impacts in an ultra-large water conveyance tunnel. The method can not only yield water hammer simulations along the full tunnel length, but also the detailed structural responses of the segment linings. In the finite element model, the pressure and velocity of fluid field is solved with FLUENT and then applied to the structure as the initial conditions or boundary information. The structural field is solved with the finite-element program LS-DYNA. The interaction between two physical fields is realized using ALE (Arbitrary Lagrangian-Eulerian) description. The structural response of a large-diameter double-line water conveyance tunnel in Shanghai under the impact of water hammer is analyzed. The results presented the propagation of water hammer pressure in the long-distance water conveyance tunnel and the effects on tunnel linings.

Key words: hybrid modeling; water-conveying tunnel; fluid-structure interaction; water hammer; structure analysis

收稿日期: 2014-07-03; 修改日期: 2014-12-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(11272214, 51475287); 国家 863 重大项目课题(2012AA01A307)

通讯作者: 金先龙(1961—), 男, 湖北孝感人, 教授, 博士, 博导, 主要从事高性能计算技术及应用研究(E-mail: jxlong@sjtu.edu.cn).

作者简介: 楼云锋(1987—), 男, 浙江东阳人, 博士生, 主要从事大型结构流固耦合高性能数值计算研究(E-mail: louyunfeng9021@sjtu.edu.cn);

曹 源(1976—), 男, 辽宁盖州人, 高工, 博士, 主要从事流固耦合、高性能计算与仿真研究(E-mail: caoyuan@sjtu.edu.cn);

杨颜志(1983—), 男, 湖南永州人, 高工, 博士, 主要从事大型复杂结构振动、冲击数值分析研究(E-mail: yyz83510@sjtu.edu.cn).

随着我国经济的发展,城市规模在近十年内得到快速扩展,城市大规模调水工程建设越来越多。输水隧道作为调水工程中的重要主体工程之一,其结构安全显得极为重要。区别于公路隧道,作为浅埋输水隧道不仅要考虑地震等自然因素,而且还要考虑由于水力瞬变引起的结构过载^[1]。

在水锤和结构响应的估算中,通常采用 Joukowski 理论计算水体速度和压力,然后将水体计算结果加到隧道结构上计算结构响应^[2]。此方法对流体和结构都做了简化,其中流体以附加质量的方式建立结构模型,而且将水压作为静压力施加,未考虑流-固动态耦合的影响,这将对水锤结构响应计算结果造成影响^[3]。对长距离输水隧道水锤数值分析中涉及到整体响应分析(沿轴向隧道应力分布)和局部细致分析^[4-5](衬砌管片变形,开裂),不同的网格尺寸和模型规模将造成计算时间、计算精度和计算细度之间的矛盾。为解决此问题,李爱群和王浩^[6]采用三维有限元建模和子模型计算,对大桥扁平钢箱梁整体和局部细致结构进行了分析。此方法首先对整体模型进行分析,然后取出局部区域模型并对其进行细致建模,再将整体计算中该区域边界的计算结果作为细致模型的边界条件进行再计算。Colella 等^[7]和 Nilakantan 等^[8]采用混合模型方法,将较粗网格的连续模型和细致网格的精细模型混合在一起建模,使得整体分析和局部分析同时进行,无需分步计算以避免边界条件的传递。

本文针对上海某大型输水衬砌隧道,引入正交各向刚度不等的连续材料衬砌模型,采用基于显式算法的 ALE 描述的流-固耦合方法和混合模型方法,对大直径双线输水隧道在水锤作用下的隧道结构响应进行了分析。主要包含水锤效应沿隧道全程传播的数值模拟分析和在水锤压力作用下衬砌环结构动力响应分析。

1 计算和建模方法

1.1 混合建模

1.1.1 衬砌环连续模型

输水隧道长度普遍有几千米,长的甚至有十几千米,而且隧道在土层中的空间结构也较为复杂。无论是隧道抗震分析还是隧道水锤负载分析,全尺寸的整体模型都是需要建立的。为了平衡模型计算时间和模型计算精度,工程上使用衬砌连续模型来模拟衬砌隧道。连续模型中忽略模型细节,而采用

连续的较粗的有限元网格离散整个衬砌环拼装隧道^[9]。

2.1.2 衬砌环精细模型

输水隧道衬砌环包含多种结构,如衬砌管片、环向螺栓、纵向螺栓、防水橡胶、手孔铸铁件。这些结构在衬砌结构输水隧道安全分析中起重要作用^[4]。因此连续模型不能完全反应出衬砌隧道的力学特性,而是需要通过对衬砌环精细模型分析才能得到相关数据。精细模型将衬砌环内各组成部件根据其几何形状建立三维有限元模型,并真实反映之间的连接、接触关系。由于对模型的细致描述将造成精细模型网格尺寸普遍较小,进而造成巨大的计算量和计算时间。若对输水隧道全程进行精细模型建模则形成的计算量,超级计算机也未能满足其计算需要。

1.1.3 混合模型

混合模型是将连续模型和精细模型相结合^[7],使得计算模型在计算时间、计算精度和计算细度上达到一定的平衡并满足工程分析需要。模型中既包含不同的单元类型,也包含不同的网格尺度。在输水衬砌隧道混合建模中具体为,计算模型包含粗网格的连续模型和细网格的衬砌环精细模型,并通过接触面将两者连接成一体。

本文采用 LS-DYNA 软件中固连的接触方式连接两种不同尺度的网格,以保证结构位移、应力在接触面上连续。如图 1 所示,将连续模型侧面作为接触面主面,相连的精细模型侧面作为接触面从面。在显式计算的每一时间步内,从面上的节点力和节点质量按式(1)分配到主面上的节点,与主面上节点加和后计算得到主面节点此刻的加速度。从面节点的加速度按式(2)通过差值方法得到。

$$\Delta f_m^i = \varphi_i(\xi_c, \eta_c) f_s \quad (1)$$

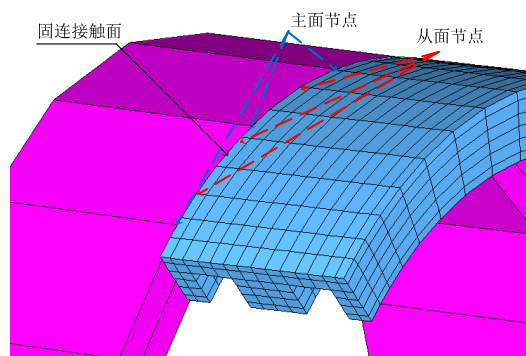


图 1 两种网格接触面

Fig.1 Tied interface between two regions

$$a_{is} = \sum_{j=1}^4 \varphi_j(\xi_c, \eta_c) a_{im}^j \quad (2)$$

其中: 下标 m 、 s 分别表示主节点和从节点; φ_i 为节点 i 的形函数; (ξ_c, η_c) 为接触点坐标; f 为节点力; a 为节点加速度。

1.2 模拟流程

输水隧道水锤冲击分析包含复杂的动态强非线性流场-结构耦合计算。FLUENT 流体计算模型和 LS-DYNA 隧道内水模型节点是一致的。FLUENT 计算得到稳态流场下流体边界即衬砌隧道内表面水压力文件和稳态流场下流体节点速度文件。在 LS-DYNA 运营工况计算时通过衬砌内表面节点 Segment 施加 FLUENT 水压力信息。在 LS-DYNA 水锤工况计算时对内水初始速度通过 Initial_velocity 读入 FLUENT 内水节点速度信息。动态流-固耦合分析通过 LS-DYNA 中多物质 ALE 流-固耦合方法计算。具体模拟流程和计算软件环境见图 2。

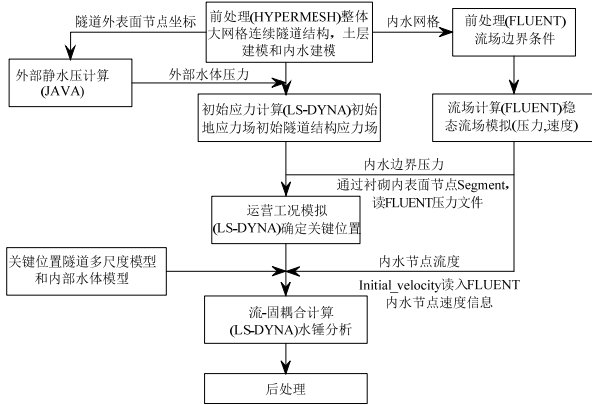


图 2 软件环境和模拟流程

Fig.2 Software environment and simulation workflow

模拟流程主要包含以下几步: 1) 根据实测数据建立输水隧道和土层整体模型, 隧道衬砌结构采用大网格连续模型, 连续模型材料参数相对于衬砌管片拼装精细模型经过刚度折减; 2) 在重力和外部水压作用下, 计算土层和结构初始应力; 3) 通过 FLUENT 计算内部流场稳态速度和压力, 将内部流场数据加入到具有初始应力场的计算模型中, 得到运营工况下的结构响应及隧道关键位置; 4) 在隧道关键位置用多环衬砌精细模型替换连续模型, 形成隧道混合模型, 并在内、外水压作用下进行流-固耦合水锤分析, 得到衬砌环应力和变形分布。

1.3 ALE 方法

水锤分析中涉及流-固耦合作用, 本文采用 ALE

方法进行水锤模拟和结构分析。该方法综合了 Lagrangian 描述与 Eulerian 描述的优点, 网格以给定的方式运动, 而材料的运动并不与网格一致, 因此, 既可追踪自由表面, 又可保证大变形问题的计算精度与计算稳定性。

针对 ALE 方法的控制方程(质量、动量和能量守恒方程)可统一表示为^[10]:

$$\rho \frac{\partial v_i}{\partial t} \bigg|_x + \rho c_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + b_i \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} \bigg|_x + c_i \frac{\partial \rho}{\partial x_i} + \rho \frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial x_i}{\partial x_j} \omega_j = c_i \quad (5)$$

式中: x 为参考坐标; v_i 为流体流动速度; x_i 和 x_j 为空间坐标; c_i 和 c_j 均为对流速度; ρ 为流体密度; b_i 为流体体力; σ_{ij} 为应力张量。

为适应显式格式求解, 流体采用弱可压缩的流体, 引入线性牛顿流体本构方程:

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + 2\mu s_{ij} \quad (6)$$

式中: p 为流体的静水压力; $\mu = \mu(s_{ij})$ 为动力粘性系数, 其在牛顿模型中为常数, s_{ij} 为应变率张量; δ_{ij} 为克罗内克常数。对弱可压缩的流体进行求解需要材料模型与状态方程配合使用。

防浪堤结构采用弹性体连续方程:

$$\rho_s \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \bigg|_X = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_i} + f_i \quad (7)$$

式中: X 是 Lagrange 坐标; ρ_s 为防浪堤结构密度; f_i 为体力; u 为结构位移。

流-固耦合需在液体和结构界面上满足几何相容条件和力的平衡条件, 即:

$$v_i = v_s = \frac{\partial u}{\partial t} \bigg|_X, \quad F_f + F_s = 0 \quad (8)$$

式中: v_i 和 v_s 分别为流-固耦合界面上水的流动速度和固体材料速度; F_f 和 F_s 分别是流体和固体结构作用在流-固耦合界面上的力, 这些力可由罚函数方法计算获得:

$$F_s = \frac{d^2 Z}{dt^2} + \xi \frac{dZ}{dt} + \omega^2 Z \quad (9)$$

式中: Z 是穿透量; ξ 是阻尼系数, 当 $\xi \leq 2\omega$ 时, 振荡趋于收敛, 因此可用于消除计算中的振荡。

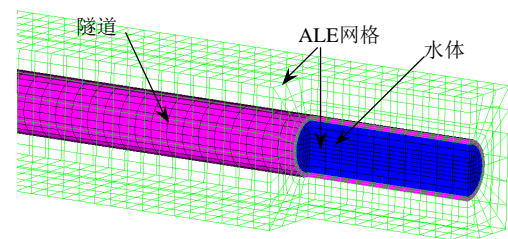
2 工程应用实例

2.1 工程概况

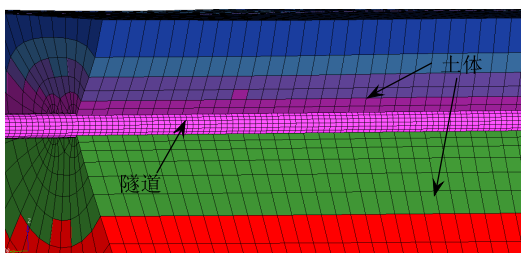
某超大规模输水隧道采用双线隧道输水, 由长兴岛域管线、长江原水过江管线、陆域管线这 3 大段组成, 总长达到 14 km, 管内输水速度为 1.8 m/s。该工程是国内首次尝试盾构法单层衬砌输水隧道, 隧道衬砌单环拼装模型宽为 1.50 m, 内径为 5.84 m, 外径为 6.80 m, 由 6 片(3+2+1)C55 混凝土衬砌片通过 7×6 根 M39 环向螺栓连接, 环间通过 16 根 M30 螺栓连接并 180°错缝拼装, 总环数大约为 10000 环。

2.2 有限元模型

根据实测地质数据, 采用六面体单元建立 120 m 深, 80 m 宽, 14 km 长的模型。衬砌隧道连续模型采用六面体厚壳单元, 划分后连续模型中衬砌周向具有 20 个单元(单元尺寸平均为 1 m), 径向具有 2 个单元(单元尺寸平均为 0.225 m), 轴向单元尺寸平均为 1.5 m, 为了弥补径向单元数目不足和单元长宽比, 可在径向设置 3 个积分点以增加计算精度。单元数约 314 万, 节点数约 357 万。衬砌局部模型如图 3 所示。衬砌环精细模型如图 4 所示, 衬砌环采用六面体单元, 划分后精细模型最小单元尺寸出现在防水橡胶处, 为 0.016 m。和连续模型相连接处的衬砌片模型径向最小单元尺寸为 0.063 m, 最大单元尺寸为 0.09 m; 环向最小单元尺寸为 0.169 m, 最大单元尺寸为 0.395 m, 单环单元数为 24000。



(a) 隧道和水体



(b) 隧道和土体

图 3 局部有限元模型

Fig.3 Local finite element model

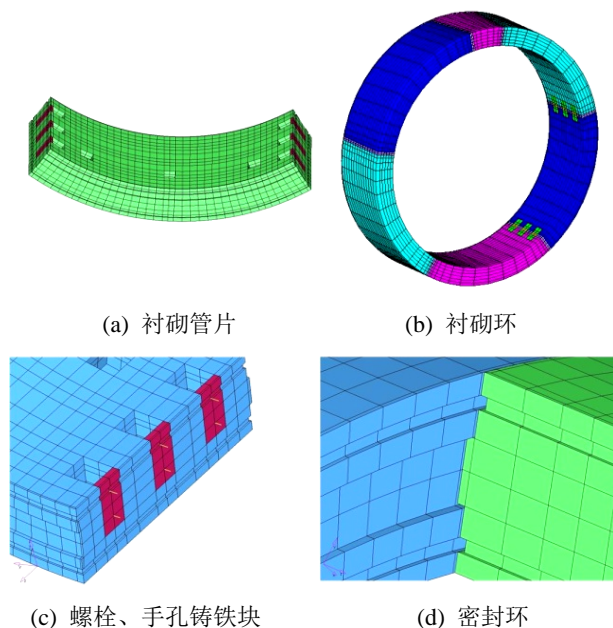


图 4 衬砌环精细模型

Fig.4 Segment lining model

2.3 模型接触及流-固耦合参数

2.3.1 接触参数

本文采用面-面对称罚函数接触算法求解接触力并模拟衬砌和土体之间挤压、滑移、脱离现象。本文从以下两方面对模型接触精度进行控制:

1) 模型结构。建模时土体与衬砌之间为两相互独立的有限元网格(边界节点并非节点重合), 通过隧道周围土体单元尺寸良好的过渡, 使得隧道周围土体单元与隧道结构单元之间在对称罚函数接触设置时形成节点对应良好的接触对。

2) 接触参数。对多个接触参数进行控制, 包括, 摩擦系数 FS 和 FD(取 0.5), 接触刚度控制参数 SFS 和 SFM(当 SOFT=1 时取默认值), 接触模式控制参数 SOFT(取 1, 即在计算接触刚度时综合考虑发生接触的节点质量与整体时间步长用以保证时间的稳定性)等。

2.3.2 流-固耦合参数

本文采用罚函数耦合方式实现内水体与衬砌的相互作用。通过模型结构和耦合参数来控制耦合精度: 首先建模时衬砌与水体 ALE 之间为两相互独立的有限元网格(边界节点并非节点重合), 内水体单元与隧道结构单元在流-固耦合设置时形成节点对应良好的耦合对; 其次设置罚函数系数(取默认值), 耦合方向 DIEC(取为 2, 仅在压缩方向耦合, 这使得节点未穿透时流体将与衬砌分离), 耦合点数 NQUAD(网格尺寸对应良好情况, 因此, 取为 1),

耦合体积分数 FRCMIN(取 0.2, 使得耦合计算较早发生, 从而有效地减小了流场泄漏现象)。

2.4 模型材料参数及边界条件

2.4.1 土层和水体材料及边界条件

隧道三维模型沿深度方向共穿越 10 层地基土, 本文采用 D-P 模型^[11-12]模拟土体力学特性, 其力学参数如表 1 所示。此外, 水体采用空材料模型(Null)结合 Gruneisen 状态方程模拟。

表 1 土层材料参数

Table 1 Mechanical parameters of soil layers

名称	重度/ (kN/m ³)	弹性模量/ MPa	泊松比	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)
灰色砂质黏土	18.7	39.390	0.27	5.00	30.5
淤泥砂质粉土	17.6	43.056	0.28	11.18	23.0
淤泥粉质黏土	16.8	98.280	0.35	14.00	11.5
灰色黏土	17.4	146.588	0.28	17.00	14.0
灰色黏质粉土	18.2	208.676	0.28	6.00	29.0
黄灰色粗砂	19.2	611.520	0.28	2.00	31.3
灰色细砂	19.2	839.150	0.28	2.00	32.0

模型的底部和侧面采用粘弹性人工边界, 顶部取为自由边界。粘弹性边界的原理是在截断边界处设置连续分布的并联弹簧-阻尼器系统, 其中弹性系数 K_b 及阻尼系数 C_b 的计算公式如下^[13]:

$$K_b = \alpha \frac{G}{R}, \quad C_b = \rho c \tag{10}$$

式中: ρ 和 G 分别表示土体密度和剪切模量; R 表示散射波源到人工边界的距离; c 表示土体中的波速, 法向人工边界取为 P 波波速, 切向人工边界取为 S 波波速; 参数 α 在法向人工边界时取为 1.33, 切向人工边界时取为 0.67^[14]。

2.4.2 衬砌层刚度

隧道整体衬砌层通过连续结构建模, 并采用正交各向异性材料模型。张建刚通过研究衬砌环力学机理得到刚度有效率^[15], 本人在文献[16]中将精细模型和连续模型进行同样加载条件下的数值仿真, 获得载荷与变形关系图从而得到刚度折减系数, 衬砌管片经刚度有效率折减后具体参数如表 2 所示。

表 2 衬砌管片参数

Table 2 Parameters of tunnel segment

衬砌管片	型号	静弹性模量/Pa	静剪切模量/Pa	密度/(kg/m ³)	泊松比	静摩擦系数
C55		3.55×10^{10}	1.48×10^{10}	2.5×10^3	0.2	0.55
连续模型		E_x/Pa 2.56×10^{10}	E_y/Pa 2.56×10^{10}	E_z/Pa 0.85×10^{10}	G_{xy}/Pa 1.1×10^{10}	G_{yz}/Pa 1.6×10^8

3 数值计算结果与分析

3.1 数值计算概况

如第 2.2 节所述, 水锤计算过程可分为 3 个步骤: 初始应力计算, 运营工况计算, 水锤流-固耦合计算。初始应力载荷条件为土层、隧道结构重力和外部水压, 外部水压通过隧道外层节点与水位高差计算而得; 运营工况载荷条件为土层、隧道结构重力, 土层初始应力场, 外部水压, 内部水压; 水锤流-固耦合载荷条件为土层、隧道结构重力, 土层初始应力场, 外部水压, 内部水压, 水锤冲击压力。

3.2 初始和运营工况分析

本文通过 LS-DYNA 软件采用预应力提取法得到计算模型土层的初始预应力。运营工况即是隧道正常输水情况下的结构分析。内部流体计算模型如图 5 所示。入口压力(P_1)和出口压力(P_2)分别为 0.13 MPa 和 0.108 MPa。水体的粘性为 $8.7 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s}$, 雷诺数达到 9×10^6 , 为湍流。使用工程流体动力学计算软件 FLUENT 计算得流体稳态压力和速度, 并导出边界压力, 作为载荷边界加到隧道连续模型内侧节点。

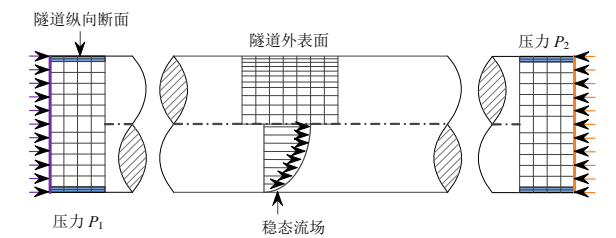


图 5 流体计算模型

Fig.5 Flow field computation model

图 6 显示运营工况下, 隧道环向应力沿隧道轴线分布情况。可以看出, 隧道初始应力沿着隧道轴线变化, 由于覆土深度造成隧道环向应力明显变化,

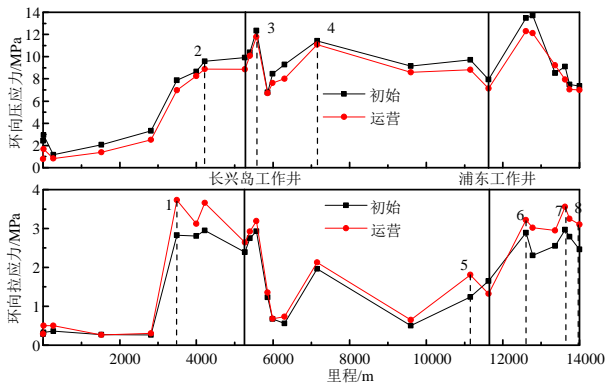


图 6 隧道环向应力沿轴向分布情况

Fig.6 Hoop stress variations along the tunnel

另外,环向压应力要大于环向拉应力。通过与初始应力相对比,也可以发现虽然内部水压相对于外部岩土及水体形成的外部载荷较小,但内部水压抵消了部分外部载荷,使得压应力有所减小,拉应力有所增加。根据隧道环向应力,标记8个关键点的位置,隧道多环精细模型将在这些位置相应的替换连续模型,从而形成混合模型对衬砌环进行更详细的分析。

3.3 水锤-流固耦合分析

3.3.1 混合模型

根据圣维南原理,当衬砌环离网格过渡面较远距离时可得到较为准确的精细衬砌环计算结果。因此,本文使用8环一组的衬砌精细模型(图7(a)所示)在8个关键断面位置替换连续模型。混合模型及接触面如图7(b)所示。精细模型和连续模型过渡面上径向单元数比例大约为3:1;环向单元比例大约为4:1。

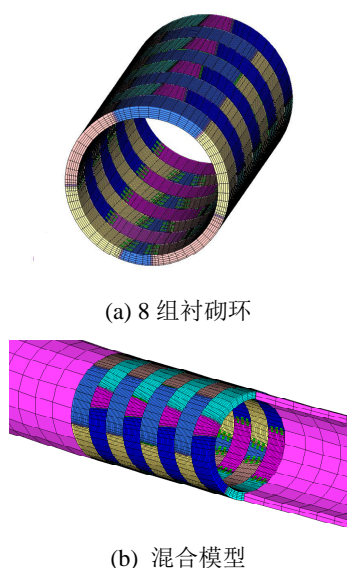


图7 衬砌环精细模型和混合模型

Fig.7 Segment lining model and hybrid model

3.3.2 水锤分析

当输水隧道出口处阀门迅速关闭时形成水锤。本文阀门关闭时间分别采用1s、30s、60s、120s、240s。通过FLUENT计算的流场结果加到内部水体节点上作为LS-DYNA流体计算的初始条件,运营工况下的计算结果作为结构计算初始条件。

图8显示了关阀时间为1s时输水隧道出口、中部和入口处水锤压力变化曲线。可以看出隧道不同位置水锤压力随时间的变化情况,出口处首先形成水锤压力,并逐渐往上传播。其传播速度可以

通过水锤周期计算而得,大约为800m/s~900m/s。水锤传播速度也可以通过Korteweg式(11)计算,大约为1100m/s。造成它们之间差别的原因可能是数值模型采用的边界约束条件和流-固耦合方法。

$$\alpha = \sqrt{eEK_f / (eE\rho + K_f D\rho)} \quad (11)$$

式中: α 为压力波传播速度; K_f 为水的体积模量; ρ 为水密度; D 为输水隧道直径; E 为隧道衬砌片弹性模量; e 为隧道衬砌片厚度。

从图8还可以看出从隧道下游至上游,水锤压力最大值逐渐减小,压力持续时间逐渐缩短。在隧道出口处最大水锤压力大约为5MPa并持续了数十秒。在隧道入口处最大水锤压力大约为3.5MPa,持续时间则很短,几乎仅仅是个脉冲冲击。

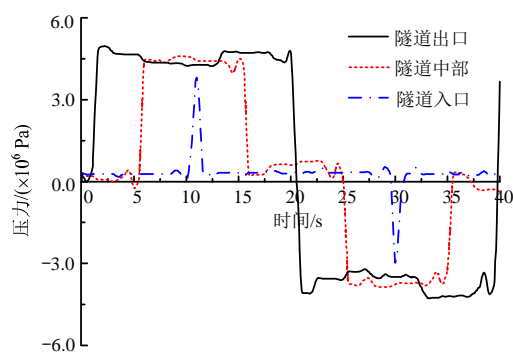


图8 水锤压力曲线

Fig.8 Water hammer pressure curves

图9显示不同关阀持续时间下,隧道入口处水锤压力曲线。可知,虽然水锤现象是高度瞬态的过程,但其形成的水压与阀门关闭时间密切相关。图10显示了水锤压力最大值与关阀持续时间的关系。可以看出,两者并不是线性关系。当关阀持续时间从30s增加到60s,水锤压力最大值减小约为60%。而当关阀持续时间达到240s时,最大水锤压力与正常运营水压相近,水锤现象几乎消失。

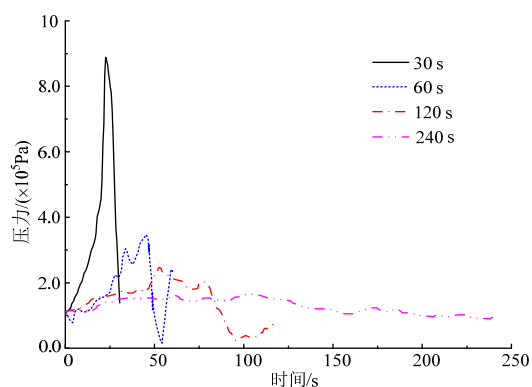


图9 输水隧道入口处水锤压力曲线

Fig.9 Water pressure curve at the entrance of the tunnel

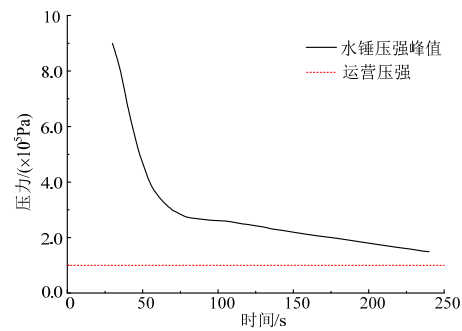


图 10 水锤压力与阀门关闭时间关系
Fig.10 Relationship curve between water pressure and valve closing time

3.3.3 衬砌结构分析

本文对水锤作用下的隧道结构动力响应作了分析。关阀时间采用 60 s。图 11 显示了第 2 关键断面位置精细模型和连续模型环向应力云图。从应力分布来看,精细模型不像连续模型那样呈连续带状分布,而是集中在管片连接处。另外精细模型的应力值大于连续模型,这主要是由于精细模型为反映出细小结构采用了较小的网格,以及通过接触拼接而成管片容易形成局部应力集中。

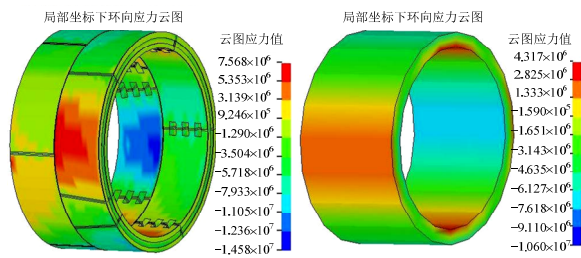


图 11 水锤作用下衬砌环精细模型和连续模型环向应力云图
Fig.11 Stress distributions of the hybrid model and an equivalent model in water hammer

衬砌环密封性对衬砌输水隧道安全至关重要,因此本文对水锤作用下衬砌环环向拉应力和环缝张开量进行了分析。相对于正常运营下衬砌环的拉应力增量可表示为:

$$S_{in}=[(\sigma_w-\sigma_n)/\sigma_n]\times 100\% \tag{12}$$

式中, σ_w 和 σ_n 分别为关键断面在水锤作用下最大环向拉应力和在正常运营工况下最大环向拉应力。

图 12 比较了精细模型和连续模型下最大拉应力的增量。可以看出最大拉应力增量沿轴向分布在两种模型下是一致的,但精细模型应力增量比连续模型小。这是因为精细模型在螺栓的预应力作用下,正常运营时具有较高的拉应力。如图 8 描述的水锤压力在隧道出口处水压最大,因此第 8 关键断面位置承受最大冲击,从而造成最大的应力增量。

其他位置中,第 4 和第 5 关键断面应力增量较大,这是由于它们在运营工况下环向拉应力较小。总的来说输水隧道在水锤作用下的最大环向拉应力在 5 MPa 以内,对隧道拉应力分布影响不是很明显。

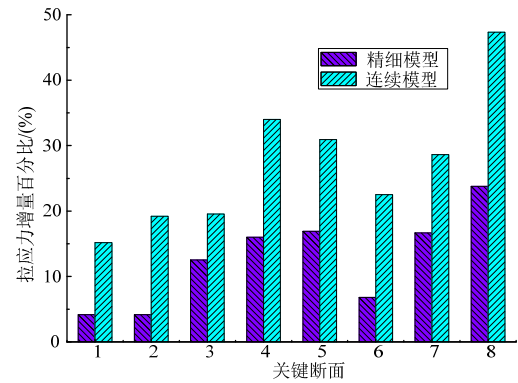


图 12 精细模型和连续模型下最大拉应力的增量
Fig.12 Comparison of tensile stress increments between the hybrid model and an equivalent model

对环缝张开量的研究中,衬砌环接口编号如图 13 所示。表 3 给出了相对于正常运营工况,水锤作用下第 2 关键断面处衬砌管片接口张开量增量。可以看出,衬砌环两侧环缝均有张开,而环顶和环底没有出现张开,错缝拼装的第 2 类衬砌环缝张开量与之相似。

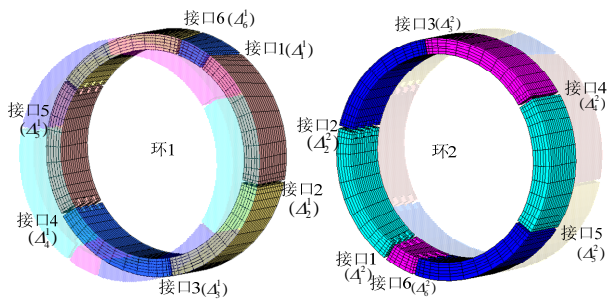


图 13 衬砌环接口
Fig.13 Segment joint number diagrams

表 3 结构横向刚度折减系数

Table 3 Joint width increments at cross section #2							
编号	A_1^1/A_1^2	A_2^1/A_2^2	A_3^1/A_3^2	A_4^1/A_4^2	A_5^1/A_5^2	A_6^1/A_6^2	
增量/mm	0.04/0.04	0.62/0.03	0.03/0.57	0.05/0.14	0.00/0.00	0.00/0.03	

图 14 显示各关键断面最大环缝张开量增量。结果显示,第 6 和第 7 关键断面处环缝张开量增量较大,这是由于下游位置水锤压力较大。第 8 关键断面由于工作井对其的加固作用,环缝张开量得到了控制。第 4 和第 5 关键断面环缝张开量较小,这是由于其位置处在隧道中部,也就是覆土深度达到 45 m 的江底部,隧道衬砌周围存在较大的土体应力和外部水压。

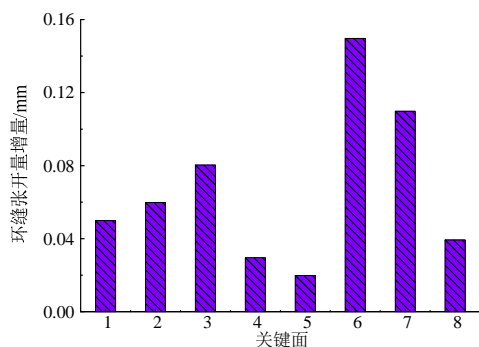


图 14 水锤作用下衬砌环环缝张开量增量

Fig.14 Maximal joint width increments at eight cross sections

4 结论

(1) 水锤压力作用下, 精细模型与连续模型整体应力分布相同, 但精细模型最大应力集中在管片接头处, 连续模型最大应力集中在环顶、环底和环两侧。最大应力值精细模型也要大于连续模型。其中的差别主要是由于精细模型中的细致结构以及其拼接装配造成的。精细模型符合衬砌管片拼装特点, 分析衬砌环局部接头受力结果将更接近实际; 连续模型等效了衬砌环整体材料特性, 可作为分析衬砌环及隧道应力分布的方法。

(2) 本文对水锤传播的模拟结果与理论解基本一致, 传播速度偏小是由于流-固耦合作用的影响。水锤压力和压力持续时间受关阀时间的影响明显, 尤其是水锤压力, 当关阀时间足够长时, 水锤现象将消失。沿着输水隧道上游至下游, 水锤压力和作用时间逐渐增大, 而且水锤作用下较大衬砌环环缝张开量主要集中在下游, 因此下游的衬砌管道失效风险较大, 需要采用延长关阀时间, 增大下游段衬砌螺栓预紧力等方式加以防范。

参考文献:

- [1] Cesano D, Olofsson B, Bagtzoglou A C. Parameters regulating groundwater inflows into hard rock tunnels-a statistical study of the Bolmen tunnel in southern Sweden [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2000, 15(2): 153-165.
- [2] 张立翔, 黄文虎, Tijsseling A S. 水锤诱发约束管道流固耦合振动频谱分析[J]. 工程力学, 2000, 17(1): 1-12.
Zhang Lixiang, Huang Wenhui, Tijsseling A S. Frequency spectrum analysis of liquid-filled pipes under water hammer - induced fsi [J]. Engineering Mechanics, 2000, 17(1): 1-12. (in Chinese)
- [3] Kochupillai J, Ganesan N, Padmanabhan C. A new finite element formulation based on the velocity of flow for water hammer problems [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2005, 82 (1): 1-14.
- [4] 封坤, 何川, 邹育麟. 大断面越江盾构隧道管片拼装方式对结构内力的影响效应研究[J]. 工程力学, 2012, 29(6): 114-124.
- [5] 鞠杨, 徐广泉, 毛灵涛, 段庆全, 赵同顺. 盾构隧道衬砌结构应力与变形的三维数值模拟与模型试验研究[J]. 工程力学, 2005, 22(3): 157-165.
Ju Yang, Xu Guangquan, Mao Lingtao, Duan Qingquan, Zhao Tongshun. 3D numerical simulation of stress and strain properties of concrete shield tunnel lining and modeling experiments [J]. Engineering Mechanics, 2005, 22(3): 157-165. (in Chinese)
- [6] 李爱群, 王浩. 子模型法在超大跨悬索桥钢箱梁应力分析中的应用[J]. 工程力学, 2007, 24(2): 80-84.
Li Aiqun, Wang Hao. Stress analysis on steel box girders of super-long-span suspension bridges with sub-model method [J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(2): 80-84. (in Chinese)
- [7] Colella F, Rein G, Carvel R, Reszka P, Torero J L. Analysis of the ventilation systems in the Dartford tunnels using a multi-scale modelling approach [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2010, 25: 423-432.
- [8] Nilakantan G, Keefe M, Bogetti T A. Multiscale modeling of the impact of textile fabrics based on hybrid element analysis [J]. International Journal of Impact Engineering, 2010, 37: 1056-1071.
- [9] 姚署霖, 闻敏杰. 黏弹性土中衬砌隧道振动响应的解析解[J]. 工程力学, 2014, 31(3): 109-115.
Yao Shulin, Wen Minjie. Analytical solutions of dynamic responses of a lined tunnel in viscoelastic soil [J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(3): 109-115. (in Chinese)
- [10] Teixeira P R F, Awruch A M. Numerical simulation of fluid-structure interaction using the finite element method [J]. Computers & Fluids, 2005, 34: 249-273.
- [11] Ding J H, Jin X L. Numerical simulation for large-scale seismic response analysis of immersed tunnel [J]. Engineering Structures, 2006, 28 (10): 1367-1377.
- [12] Krajcinovic D, Silva M A G. Statistical aspects of the continuous damage theory [J]. International Journal of Solids Structures, 1982, 18(7): 551-516.
- [13] Liu Jinbo, Du Xiuli, Wang Zhenyu, Wu J. 3D viscous-spring artificial boundary in time domain [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2006, 5(1): 93-102.
- [14] 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)
- [15] 张建刚, 何川. 盾构隧道衬砌整环力学机理模型[J]. 工程力学, 2013, 30(7): 136-142.
Zhang Jiangang, He Chuan. Model of mechanical behavior with whole segmental lining of shield tunnel [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(7): 136-142. (in Chinese)
- [16] 楼云锋, 杨颜志, 金先龙. 输水隧道地震响应的多物质 ALE 数值分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(7): 2095-2102.
Lou Yunfeng, Yang Yanzhi, Jin Xianlong. Numerical simulation of ALE multi-material method for water-conveying tunnel seismic response [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(7): 2095-2102. (in Chinese)